

基于小波变换的飞机电力作动系统故障诊断

肖 蕾, 李颖晖, 赵 鷟, 钟世刚

(空军工程大学 工程学院, 陕西 西安 710038)

摘 要: 电力作动系统是多电/全电飞机上完成各任务操作的最后环节,其工作状态直接影响飞行安全。针对飞机机电作动系统不同部件的故障信息处于不同频带的特点,提出一种基于“能量—故障状态”的故障诊断模式识别方法。通过小波包分解,把原始信号正交分解到不同的频带内,利用各频率成分的变化,选择合适的能量特征向量对各故障目标进行特征提取,从而建立能量变化到各故障原因和类别的映射关系,通过与对应故障特征向量的标准样本进行比较,即可得出电力作动系统当前有无故障和故障轻重程度的结论。通过匝间短路故障诊断仿真实例验证了该方法的正确性和有效性。

关键词: 电力作动系统;故障诊断;小波包

DOI:10.3969/j.issn.1009-3516.2009.05.012

中图分类号: TP306⁺.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1009-3516(2009)05-0055-04

“多电/全电”是未来先进飞机的发展趋势,其重要特征就是电力作动取代液压作动,随之带来的优越性是整机可靠性大幅度提高,重量大幅度减小,维修性改善。电力作动系统是完成各功能系统任务操作的最后环节,其工作状态直接影响到飞行的安全,对飞行任务的完成起着决定作用。因此,及时准确诊断、预测电力作动系统可能发生的故障,具有重要意义^[1]。

一般情况下,电力作动系统实现将机械力、电力、液压力转变为特殊效用的机械力,通常作为位置伺服系统应用于多个飞机子系统。电力作动器(Electromechanical Actuation, EMA)是电力作动系统的核心部件,多电/全电飞机中的 EMA 完全取消了液压部分,常被用来驱动各种各样的飞行器子系统,包括飞控系统的舵面、刹车系统等。电力作动系统的基本原理如图 1。



图 1 电力作动系统的基本原理结构图

Fig. 1 Fundamental configuration of electromechanical actuation system

一般地,电力作动系统不同部件的故障信息位于处于不同的频带内,如电机转子不平衡、不对中、轴弯曲等缺陷表现为转速的基频及其低阶谐波,位于低频带;减速齿轮的啮合频率位于中频带;轴承及齿轮缺陷引起的冲击振动频率一般位于高频带。通过小波包分解,把原始信号正交分解到不同的频带内,不同的故障信息以及噪声得以分离,有利于故障源分析^[2]。

* 收稿日期:2009-06-18

基金项目:国防预研基金资助项目(9140A27020307JB32)

作者简介:肖蕾(1978-),女,陕西西安人,博士生,主要从事现代控制理论在航空电气系统故障诊断、健康管理中的应用研究;E-mail:xl661@163.com
李颖晖(1966-),女,湖南株洲人,教授,博士生导师,主要从事现代控制理论在航空电气控制和故障诊断、健康管理中的应用研究。

由于经过小波包分解的各频率成份信号的能量中,包含着丰富的故障信息^[3-7],基于此,可以找到一种基于“能量—故障状态”的故障诊断模式识别方法,即利用各频率成分的变化,选择合适的能量特征向量对各故障目标进行特征提取,就可以建立能量变化到各故障原因和类别的映射关系,得到表征各故障原因的特征向量。与对应故障特征向量的标准样本进行比较,即可得出电力作动系统当前有无故障和故障轻重程度的结论,从而实现电力作动系统的故障诊断^[8-10]。

1 小波包故障特征提取方法的基本原理

基于小波包的故障特征提取方法提取信号各频段的能量,其理论依据是帕斯维尔(Parseval)能量积分等式。小波变换中,原始信号 $f(x)$ 在 $L^2(R)$ 上的信号 2 范数定义为:

$$\|f\|_2 = \sqrt{\int_R |f(x)|^2 dx} \quad (1)$$

则:

$$\|f\|_2^2 = \int_R |f(x)|^2 dx \quad (2)$$

因此,小波变换中的 2 范数的平方等价于原始信号在时域的能量。 $f(x)$ 的小波变换为:

$$C_{kj} = W(2^k, 2^k j) = 2^{-\frac{k}{2}} \int_R f(x) \psi^*(2^{-k}x - j) dx \quad (3)$$

式中 $\psi^*(x)$ 为基小波 $\psi(x)$ 的对偶。根据式(2)、式(3)以及 Parseval 能量积分等式^[1],有:

$$\int_R |f(x)|^2 dx = \sum_j |C_{kj}|^2 \quad (4)$$

由式(4)可知,小波变换系数 C_{kj} 具有能量的量纲,可以作为故障诊断的能量特征提取^[2]。设小波包分解后第 k 层的第 j 个频带对应的信号为 E_{kj} ,则有:

$$E_{kj} = \sum_{m=1}^N |x_{jm}|^2 \quad (5)$$

式中: N 为数据长度; k 为小波包分解层次; $j = 0, 1, \dots, 2^k - 1$ 为分解频带的序号; m 为第 k 层的第 j 个频带的重构信号的离散点; x_{jm} 为重构信号离散点的幅值。将第 k 层各频带内的信号的能量特征组成一个能量特征向量:

$$\mathbf{T} = \mathbf{T} = \left[\frac{E_{k0}}{E}, \frac{E_{k1}}{E}, \dots, \frac{E_{k(2^k-1)}}{E} \right], \quad E = \sum_{j=0}^{2^k-1} |E_{kj}| \quad (6)$$

能量特征向量 \mathbf{T} 反映了原始信号在各个频率段内的能量分布情况,包含着故障信息,可作为故障特征进行提取。

2 仿真实例

利用“能量—故障状态”方法,对正常状态和不同程度匝间短路状态下的机电作动系统的电磁转矩信号进行分析,构造出各自的特征向量,建立“特征向量—系统状态”的对应关系。以一组正常电磁转矩信号和一组匝间短路故障的电磁转矩信号为例,信号采样频率为 10 kHz,对 2 组信号分别进行 3 层 db3 小波包分解,在尺度 3 上形成 $2^3 = 8$ 个频带,信号频带宽度为 0 Hz—625 Hz,各频带对应频率范围见表 1。各频率成分的重构信号见图 2。

表 1 小波包分解后节点对应的频率范围

Tab. 1 The frequency range corresponding to the nodes transformed by the wavelet package

节点	频率/Hz	节点	频率/Hz
1	0—625	5	2 500—3 125
2	625—1 250	6	3 125—3 750
3	1 250—1 875	7	3 750—4 375
4	1 875—2 500	8	4 375—5 000

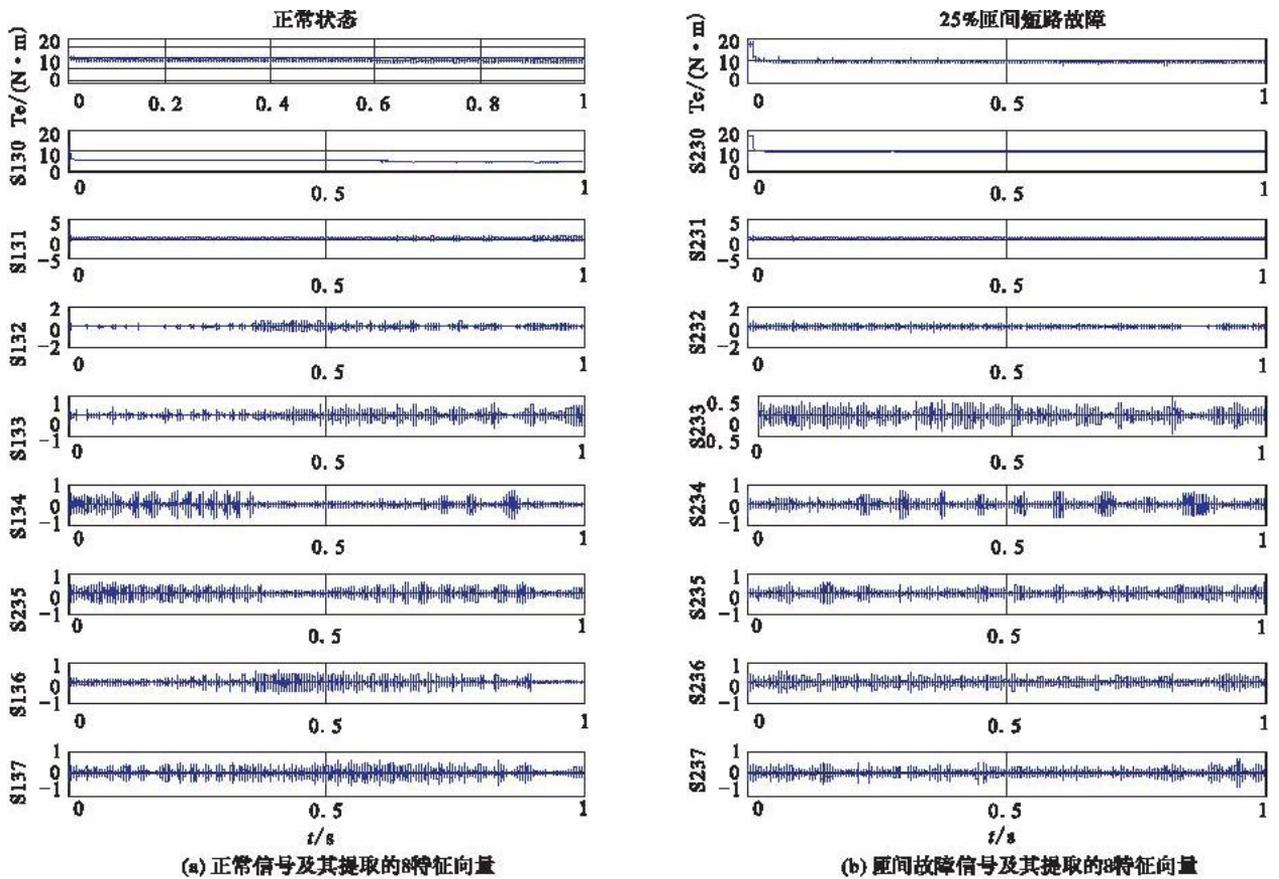


图2 电流信号小波包特征提取

Fig. 2 Feature extraction of the current signal by the wavelet package

计算各个重构系数的能量特征值,获得能量特征向量,图3给出了仿真数据计算的结果。在电机正常和不同程度的匝间短路故障状况下,电磁转矩信号经小波包分解后得到的能量特征向量有所变化,其中频带1的能量特征值变化最为明显。由图3可以看出,随着短路程度增大,故障程度增大,1号频带的能量特征值呈上升趋势,较好地反映了故障变化情况。其它故障特征频率分量由于能量较小,对故障的反映不是很明显,因此只需比较频带1的能量特征即可。

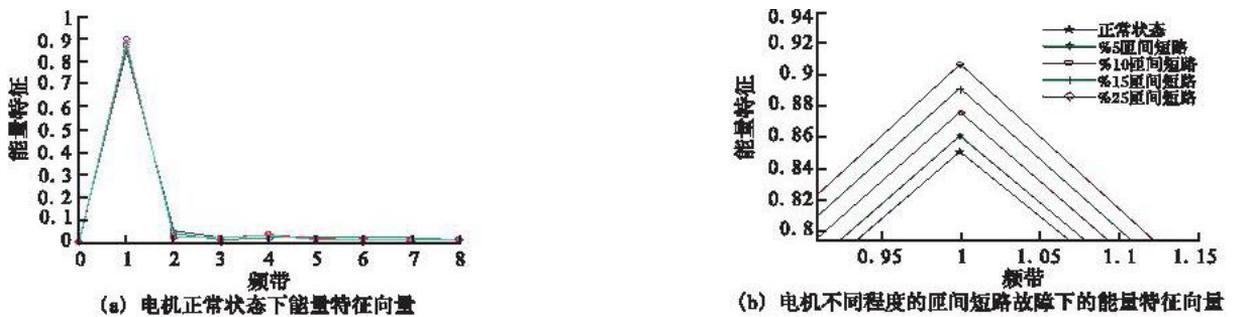


图3 电流小波包分解后各频带的能量特征值及其局部放大

Fig. 3 The current signal's frequency energy eigenvector transformed by wavelet package and its selective enlargement

3 结论

依据特征向量能量的不同可以确定是否有故障以及故障的程度。仿真结果表明,这种基于小波包分解得到的能量特征向量,可以作为故障特征向量进行故障诊断。同时,这种故障诊断的方法可以实施故障特征提取,为后续的故障预测提供支持。在进行诊断时,该方法无须被诊断系统数学模型,因此具有良好的工程推广应用价值。

参考文献:

- [1] 曾声奎, Michael G Pecht, 吴 际. 故障预测与健康管理(PHM)技术的现状与发展[J]. 航空学报, 2005, 26(5): 626—631.
ZENG Shengkui, Michael G Pecht, WU Ji. Status and Perspectives of Prognostics and Health Management Technologies [J]. Acta Aeronautica & Astronautica Sinica, 2005, 26(5): 626—631. (in Chinese)
- [2] 黄剑峰, 林瑞光. 无刷直流电机可靠性及其故障模式分析[J]. 电机与控制学报, 2000, 4(4): 198—201.
HUANG Jianfeng, LIN Ruiguang. Analysis of BLDCM Reliability and Failure Model [J]. Electric Machines and Control, 2000, 4(4): 198—201. (in Chinese)
- [3] 秦前清, 杨宗凯. 实用小波分析[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 1994.
QIN Qianqing, YANG Zongkai. Analysis of Practical Wavelet [M]. Xi'an: Xidian University Press, 1994. (in Chinese)
- [4] Hansen R J, Hall D L, Kurtz S K. New Approach to the Challenge of Machinery Prognostics [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 1995, 117(2): 320—325.
- [5] 姚华堂, 盛颂恩, 劳佳锋. 基于小波变换的智能混合诊断系统[J]. 机电工程, 2002, 20(4): 65—67.
YAO Huatang, SHENG Songen, LAO Jiafeng. Intelligence Hybrid Diagnosis System Based on Wavelet Transform [J]. Mechanical & Electrical Engineering Magazine, 2002, 20(4): 65—67. (in Chinese)
- [6] 秦宣云, 卜英勇. 基于小波变换的故障信号检测[J]. 中南工业大学学报: 自然科学版, 2002, 33(4): 434—437.
QIN Xuanyun, BU Yingyong. Signal Detection and Fault Diagnosis Based on Wavelet Transform [J]. Journal of Central South University of Technology: Natural Science Edition, 2002, 33(4): 434—437. (in Chinese)
- [7] 于芙蓉, 王淑芳. 小波变换在振动故障信号仿真研究中的应用[J]. 北京石油化工学院学报, 2008, 16(3): 47—50.
YU Furong, WANG Shufang. The Application of Wavelet Transform in Simulation Study of Vibration Malfunction [J]. Journal of Beijing Institute of Petro-Chemical Technology, 2008, 16(3): 47—50. (in Chinese)
- [8] 安茂春. 故障诊断专家系统及其发展[J]. 计算机测量与控制, 2008, 16(9): 1217—1219.
AN Maochun. A Survey on Fault Diagnosis Expert Systems [J]. Computer Measurement & Control, 2008, 16(9): 1217—1219. (in Chinese)
- [9] 王宏力, 侯青剑. 故障诊断方法现状与展望[J]. 传感器与微系统, 2008, 27(5): 1—4.
WANG Hongli, HOU Qingjian. Present Situation and Prospects of Fault Diagnosis Methods [J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2008, 27(5): 1—4. (in Chinese)
- [10] 郑小霞, 钱 锋. 动态系统故障诊断技术的研究与发展[J]. 化工自动化及仪表, 2005, 41(4): 1—7.
ZHENG Xiaoxia, QIAN Feng. Research and Development of Fault Diagnosis Methods for Dynamic System [J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2005, 41(4): 1—7. (in Chinese)

(编辑: 徐楠楠)

The Fault Diagnosis of the Aircraft Electromechanical Actuation System Based on Wavelet Transformation

XIAO Lei, LI Ying-hui, ZHAO Kun, ZHONG Shi-gang

(Engineering Institute, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China)

Abstract: The electromechanical actuation system is the last link for completing all the task operation in the modern airplane, and its working condition directly influences the flight safety. According to the characteristic that the fault information of different components of the aircraft electromechanical actuation system is in different bands, a new pattern recognition method of fault diagnosis based on "energy—fault state" is proposed. First the original signal is orthogonally decomposed into different bands by wavelet packet transformation, and the target fault features are extracted by the chosen eigenvector. Then the mapping relation between energy and fault state is obtained, which can be used as the judgment of fault degree through the comparison with the standard sample of the corresponding eigenvector. Finally the paper verifies the correctness and effectiveness of the method by the simulation example of the fault diagnosis in inter—turn short circuit

Key words :electromechanical actuation system ; fault diagnosis ; wavelet packet