

液压系统故障诊断方法综述

施锦丹¹, 王凯², 王伯成³, 王效飞³

(1. 中国人民解放军 63961部队 22分队, 北京 100012; 2. 第二炮兵驻孝感地区军事代表室, 湖北孝感 432100; 3. 中国人民解放军 91868部队 78分队, 海南三亚 572016)

摘要: 简要回顾了液压系统故障诊断方法的发展, 归类分析了液压系统故障诊断的方法, 总结了各种方法的优缺点, 展望了液压系统故障诊断的发展趋势与动态。

关键词: 液压系统; 故障诊断; 信号分析; 人工智能

中图分类号: TP206.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001 - 3881 (2008) 11 - 175 - 5

An Overview of Fault Diagnosis Technology for Hydraulic System

SHI Jindan¹, WANG Kai², WANG Bocheng³, WANG Xiaofei³

(1.No. 63961 Unit of the PLA, Beijing 100012, China;

2. The Military Deputy Office of the Second Artillery in Xiaogan City, Xiaogan Hubei 432100, China;

3.No. 91868 Unit of the PLA, Sanya Hainan 572016, China)

Abstract: The development of the diagnosis technology for hydraulic system was reviewed, and the principles of fault diagnosis method were analyzed and classified. The strongpoint and the shortcoming were summarized. The further research of this technology was presented and the trend was prospected.

Keywords: Hydraulic system; Fault diagnosis; Signal analyzing; Artificial intelligence

国内外工程机械的传动和执行机构都普遍采用了液压技术, 大量机械设备的自动化控制也往往借助液压系统来实现。统计表明, 机械设备发生的故障半数以上都与液压系统有关。液压系统的状态直接影响、甚至决定机械设备的运行状况。因此对液压系统进行故障诊断, 对社会生产具有极为重要的意义和作用。国内外学者对此进行了大量的研究, 笔者对液压系统故障诊断技术的发展现状进行了分析和总结, 并展望了该技术的发展趋势。

液压系统故障诊断属于机械故障诊断的范畴, 许多机械故障诊断方法可以直接应用于液压系统的故障诊断。诊断方法从以专家或维修人员的感官、个人经验及简单仪表为依据的传统诊断技术, 发展为以传感器技术、动态测试技术为手段, 以信号分析和建模处理为基础的现代诊断技术, 现在已发展到以信号分析、建模与知识处理技术为基础, 以信息融合技术为核心的智能诊断技术。概括说来, 用于液压系统故障诊断的方法可分为简易的故障诊断、基于信号分析的故障诊断和基于人工智能的故障诊断三大类, 下文将就三类方法进行详细的分析和比较。

1 简易的故障诊断方法^[1-2]

1.1 传统的主观诊断法

传统的主观诊断法, 指的是维修人员凭借个人的

实践经验, 通过看、听、摸、闻、问, 或借助简单的仪器、仪表, 判断系统故障发生的部位和原因。常用的方法有感官诊断法、方框图分析法、系统图分析法等。该方法是维修人员利用系统或元件的结构、模型和功能等方面的知识, 进行综合分析和判断, 因此要求维修人员掌握大量的故障机理知识和具备丰富的诊断经验。

主观诊断法简单、方便并且快捷, 但诊断结果常带有主观倾向性, 难于满足复杂的液压系统的故障诊断的需求。

1.2 直接性能测试的方法

直接性能测试的方法是通过液压元件和系统的性能测试, 来评价系统的工作状态。该方法也可进行在线状态监测和故障诊断, 并对故障进行定量分析, 已被应用在许多液压系统的状态监测中。其基本思想: 在正常情况下, 被测试液压元件和系统的性能测量值应在正常范围内变动, 当超出此范围时, 可以认为已经发生或将要发生故障。在液压元件和系统性能测试中, 常见的测量参数有压力、流量、温度, 以及其它相应类型的参数。另外, 还可以用被测量的变化率是否在正常范围内来判别故障是否发生。

该方法原理简单, 概念直观。然而, 性能测试对早期失效不很敏感, 只有当系统失效发展成十分严重

收稿日期: 2008 - 04 - 16

作者简介: 施锦丹 (1981—), 男, 江苏启东人, 汉族, 硕士, 助理工程师, 研究方向为武器系统论证。电话: 13572075154, E-mail: luodcheng@163.com。

时, 其性能指标变化才有所体现。

2 基于信号分析的故障诊断方法^[1-2]

2.1 基于油样分析的方法

液压系统中的污染物带有大量反映系统内部状态的信息。因此, 通过对油液中污染物成分鉴别和含量测定, 可以了解液压系统油液的污染状况以及元件的工作状况, 为液压系统的故障诊断和维护提供依据。目前常用的油样分析技术和方法有以下两种。

(1) 基于油液颗粒污染度的检测技术

显微镜检测技术: 采用光学显微镜测定油液中污染颗粒的尺寸分布和浓度。

自动颗粒计数器: 该项技术利用光学自动颗粒计数器将油液中悬浮的固体颗粒进行计数, 间接测量油液的污染度。由于光学自动颗粒计数器可能将油液中悬浮的微小气泡和水珠当作固体颗粒进行计数, 因此, 在测量前需要对油样进行脱气处理, 以减少计数误差。

称重法: 该方法主要利用油液的质量和密度之间的对应关系, 通过测量单位体积的油液的质量和理论质量的比对, 确定一定容量的油液所含污染物的总量。

铁谱分析法: 主要用于鉴别油液中与磨损有关的磨屑, 进行磨屑成分鉴定和含量测定。利用铁谱分析可以得到定量的数据, 也可以进行定性分析。

光谱法: 该项技术能够给出油液中污染物各元素的成分、浓度, 可辨别出液压系统的磨损状态及其部位, 为预报初期故障提供了依据。

显微镜检测技术设备投资较少, 且方法简单, 但劳动强度大、费时、误差较大; 自动颗粒计数器方法具有检测速度快、准确度高和操作简便等优点, 但可能将油液中悬浮的微小气泡和水珠当作固体颗粒进行计数, 精度较低; 称重法使用设备简单, 检测方便, 但只能测定油液的污染物总量, 无法掌握污染颗粒尺寸和分布特征; 铁谱分析可以得到定量的数据, 也可以进行定性分析; 光谱分析的精度较高, 但成本较高。

(2) 基于油液性能参数的检测技术

受潮气入侵、气蚀、腐蚀、液压元件各运动副间磨损等作用, 液压油中金属、非金属元素、氧化物的含量、形态发生变化, 反映出液压系统中磨损、腐蚀及密封状态; 液压油的粘度、酸碱值等性能指标的改变也是系统状态发生变化的征兆之一。油液性能参数检测技术根据经验和专家知识, 建立基于液压油中性能变化与液压系统及其元件状态间的关系库, 运用神经网络、专家系统、模糊推理等推理机制, 判定和预测系统的故障。

该技术需对油液的有关参数及金属含量进行细致

的分析, 监测周期长, 不适合液压系统故障的在线检测, 但在重要液压系统的故障诊断方面有巨大的潜力。

2.2 基于振动、噪声分析的方法

振动、噪声是液压系统在运行过程中伴随的必然现象, 特别对液压泵来说, 其壳体振动十分明显。设备的振动、噪声信号中包含有大量丰富的故障信息, 通过对信号的分析可以获得许多有关元件的状态信息, 有助于确定设备的工作状态, 从而有效地进行故障诊断。

目前对于利用振动、噪声分析进行设备故障诊断的研究较多, 其理论和方法比较完善。常用的信号处理的特征提取方法有时域特征参数法、时差域特征法、概率密度法、相关分析法、谱分析法、自功率谱分析法、倒频谱分析法、包络谱分析法、主分量自回归谱提取法、AR 谱参数提取法、小波分析等。振动分析技术已成功地应用于旋转机械设备的故障诊断, 在纯机械设备的故障诊断中取得了很大成功。

在液压系统中存在油液, 其振动信号里包含了大量的噪声, 既有机械振动, 又有流体振动, 使得信号处理非常困难。因此目前在国内外公开发表的文献当中, 关于基于振动、噪声分析的方法在液压系统故障诊断中应用的相关文献较少。随着信号处理技术的不断发展, 振动分析技术在液压系统故障诊断中的应用前景将更为广阔。

2.3 基于数学模型的诊断方法^[3-5]

模型诊断方法是以现代控制理论和现代优化方法为指导, 以系统的数学模型为基础, 利用观测器(组)、等价空间方程、Kalman 滤波器、参数模型估计和辨识等方法产生残差, 然后基于某种准则或阈值对该残差进行评价和决策。基于模型的诊断方法能与控制系统紧密结合, 是监控、容错控制、系统修复和重构的前提。液压伺服系统的故障诊断常采用基于数学模型的方法。

基于数学模型的诊断方法其准确性和精度主要取决于所建立模型的准确性。目前该领域研究的重点是(线性和非线性)系统故障诊断的鲁棒性、故障可检测性和可分离性, 以及利用非线性理论进行非线性系统的故障诊断。

3 基于人工智能的故障诊断方法

3.1 基于专家系统的智能诊断方法^[6-8]

专家系统(Expert System)是诊断领域引人注目的发展方向之一, 也是目前研究最多、应用最广的一类智能诊断技术, 它运用专家知识和推理方法求解复杂的实际问题。实质上专家系统是一种人工智能计算机程序, 具有大量的权威性知识, 具备较强的学习功能, 并能够采取一定的策略, 运用专家知识推理, 解

决人们在通常条件下难以解决的问题。

故障诊断专家系统主要由知识库、数据库、推理机和解释机制等组成。对于在线监测或诊断系统，数据库的内容是实时检测到的工况数据；对于离线诊断，数据库中的内容可以是实际故障时检测到的数据，也可以是人为设置故障时检测到的一些样本数据。知识库中存放着与诊断系统相关的知识，包括系统知识和规则库。系统知识是反映系统工作机理及系统结构的知识；而规则库是反映故障因果关系的规则。专家系统在运行中通过人机交互获得必要信息后，在知识库和数据库的支持下，推理机综合运用各种规则，调用各种相关的应用程序，进行一系列推理，从而找到最可能故障。解释机制对推理过程进行解释，并提供相应的维修建议。

专家系统给液压系统故障诊断带来了很大方便，为液压系统故障诊断自动化奠定了基础，但诊断专家系统在实际应用过程中也存在一些问题，主要是缺乏有效的诊断知识表达和不确定性知识推理，同时知识的获取也存在“瓶颈”问题。

3.2 基于神经网络的智能诊断方法^[9-10]

人工神经网络 (Artificial Neural Network) 理论是 20 世纪 80 年代中后期迅速发展起来的人工智能领域的一个重要分支，其本质是一种接近人的认知过程的计算模型，模仿大脑神经元结构特性而建立起来的一种非线性动力学网络系统。神经网络由大量类似于神经元的非线性处理单元高度并联和互联而成，具有类似于大脑的某些基本特征，如学习、记忆、归纳等，还具有强大的数学模拟能力。它以高度的并行分布式处理能力、联想记忆、自组织能力、自学习能力和极强的非线性映射能力，在故障诊断领域显示出了广阔的应用前景，在液压系统诊断领域神经网络诊断方法也得到了广泛重视。

利用神经网络的学习功能、联想记忆功能、分布式并行信息处理功能以及强大的非线性映射能力，解决故障诊断系统的知识表示、知识获取和并行推理问题，为智能诊断技术的发展开辟了新的途径。但学习速度慢，易陷入局部极小点，要求训练集具有完备性，以及知识描述不具有透明性。将神经网络与遗传算法、专家系统、模糊集理论、证据理论等理论方法相结合，在一定程度上克服神经网络的缺点，是故障诊断领域发展的趋势之一。

3.3 基于模糊理论的智能诊断方法^[11-12]

在液压系统的故障诊断领域，存在着大量模糊现象。故障症状的描述，如系统油温过高、压力波动严重、液压泵温升过高等都是模糊概念。液压系统中大量的渐变故障，其边界也是不清晰的，而故障的发展通常要经过一个漫长且具有模糊性的中间过渡过

程。另一方面，影响液压系统发生故障的原因是多种多样的，一种症状可能是多种原因引起的，而一个原因会引起多种症状，因此故障原因与症状之间的关系也是模糊的。

模糊集 (Fuzzy Set) 理论可以有效地处理上述模糊性难题。模糊诊断方法利用模糊逻辑来描述故障原因与故障现象之间的模糊关系，通过隶属函数和模糊关系方程来解决原因与状态识别问题。模糊理论中的隶属函数和模糊关系通常是为了满足实际问题的需要，根据专家经验或统计规律人为确定的，虽带有一定的主观性，但模糊性对问题具有一定泛化能力，在一定程度上消除了人为的主观性。

模糊理论反映了自然界的客观现象，其诊断结果更符合实际，而且诊断速度快、容易实现，是一种较好的诊断方法。模糊理论和神经网络、专家系统、故障树分析等理论方法相结合，可更有效地实现故障诊断。

3.4 基于故障树的诊断方法^[13]

故障树分析法 (Fault Tree Analysis) 是把系统故障与导致该故障的各种因素形象地绘成故障图表，直观地反映出故障、元部件、系统及原因之间的相互关系，是实际系统中常用的、比较有效的故障诊断方法。故障树分析所需要的前提是掌握有关故障与原因的先验知识和故障率的知识。诊断过程是从系统的最终故障开始，通过不断提问“为什么会发生这种现象”而逐级构造成一棵倒立的故障树。然后利用系统的实时动态数据，通过对故障树的启发式搜索，查到故障的最终原因。

在对故障树的搜索过程中，传统的方法是按照底事件发生概率的大小来决定先后顺序，但这在实际的液压系统故障诊断中是不现实的。由于对不同的液压元件进行“假设-验证”检测的难易程度和成本不同，检测过后所得到的启发式信息量也不同，因此在确定底事件的搜索顺序时不仅要考虑故障发生概率的大小，还要综合考虑检测成本及信息量的大小，才能得到最优的效果。

在对液压系统进行故障树分析时，应先按功能对其进行层次分解，然后再对分解后各子系统分别建立故障树，这样可以加速故障诊断的进程。

故障树分析所需要的前提是掌握有关故障与原因的先验知识和故障率的知识。但对于大型液压系统而言，故障树的建造十分困难，而且得到的故障树也较难分析。故障树分析法与模糊理论相结合，形成模糊故障树分析法，该方法兼顾模糊理论和故障树法的优点，对故障同时进行定性和定量分析，有利于提高诊断效率和诊断精度。

3.5 基于灰色理论的智能诊断方法^[14-15]

灰色理论是我国学者邓聚龙教授于 1982 年首先

提出的,是控制论的观点和方法的延拓。灰色理论从系统论的角度来研究信息间的关系,即利用已知的信息来揭示未知的信息,具有自学习和预测功能。灰色理论的诊断方法利用灰色系统的建模(灰色模型)、预测和灰色关联分析等进行故障诊断。主要方法有灰色预测、灰色统计、灰色聚类、灰色关联度分析、灰色决策。

灰色系统理论在使用中不追求大的样本量,不要求数据有特殊的分布规律,计算量相对小且不会出现与定性分析不一致的结论,其方法简单实用,且获得的信息量较丰富,结果较全面。但由于灰色系统理论本身还不完善,如何利用已知信息更有效地推断未知信息仍是一个难题。

3.6 基于案例推理诊断方法^[16-17]

案例推理(Case-based Reason)是人工智能中新兴的一种推理技术,它使用过去的经验案例指导解决新问题的方法。其基本思想:根据问题描述,案例检索机制从案例库中查找与当前问题匹配的案例,若能找到完全匹配的案例,系统就按以往的求解思想解决给定问题;若找不到完全匹配的案例,就查找与之类似的案例,并对检索出的案例进行适当修改,以满足当前问题的需要。同时将该结果作为一个新案例经索引机制存储到案例库中,这就是案例推理的学习功能。基于案例推理的关键是如何建立有效的案例索引机制与案例组织方式,因为索引机制决定案例的组织结构,而案例组织的好坏将直接影响系统的搜索效率甚至决定故障诊断成败。

案例诊断根据过去案例解决新问题,不需人为从案例中提取规则,从而降低了知识获取的负担,也减轻了组合问题空间搜索的负担。但由于能搜集到的诊断案例是有限的,不可能覆盖所有解空间,搜索时可能会漏掉最优解;当出现异常征兆时,由于找不到最佳匹配,可能造成误诊或漏诊。另外,维护故障案例之间的一致性比较困难,改写新案例需要另外的知识。

3.7 基于多智能体的智能诊断方法^[18]

近些年来,多智能体系统(Multi-agent System)已成为分布式人工智能(DAI)研究的一个热点,主要研究的是自主的Agent之间智能行为的协调。为了一个共同的全局目标,也可能是各自不同目标,共享有关问题和求解方法的知识,协作进行问题的求解。

多智能体的思想为解决由于传统的单结点体系结构中知识与程序耦合过于紧密、复杂而造成对大型复杂系统设备难以实现诊断维护的问题提供了一个有效的方法。可以预见多Agent系统必将在智能故障诊断技术的发展过程中发挥巨大的作用。

3.8 基于信息融合技术的智能诊断方法^[19-22]

近年来迅速发展起来的多传感器信息融合技术,

是研究多源不确定性信息综合处理的理论和方法。目前该技术已成功应用于众多的领域,其理论和方法已成为智能信息处理的一个重要研究方向。信息融合技术的发展和应用于故障诊断技术注入了新的活力,使基于多传感器或多方法综合的故障诊断技术具备了系统化的理论基础和智能化的实现手段。国内有将信息融合技术应用于液压系统单个部件(如液压泵)的故障诊断,至于信息融合技术应用于液压系统中,目前相关报道很少。

多传感器融合是提高状态监测与故障诊断可靠性的有效措施,信息融合为多传感器信息处理提供技术支持,使之既可以充分利用信息,又可以消除传感器相互矛盾的数据,以及不同方法的诊断结果的不一致性。

将信息融合技术应用于故障诊断领域,在一定程度上能够获得精确的状态估计、增加置信度、降低模糊度,充分利用传感器网络的资源和调度系统,最大限度地提高资源的利用率。

4 液压系统故障诊断的发展趋势

综合国内外液压系统的状态监测和故障诊断技术发展近况看,近些年来液压系统故障诊断逐渐引起人们的重视,对其研究也十分活跃,专家系统、神经网络和模糊理论等诊断方法已在液压系统故障诊断方面获得充分应用。液压系统的故障诊断已朝着自动化、智能化方向发展。以传感器技术和现代信号处理技术为基础,以信息融合技术为核心的智能诊断技术代表了当今液压系统故障诊断技术发展的主要方向。具体体现为以下几个方面:

(1) 将现代信号处理技术应用于液压状态信号处理中,提取最有效的特征量,为信息融合处理奠定基础。

(2) 将遗传算法、专家系统、神经网络、模糊理论等方法相互结合,采用多方法融合处理,以提高故障诊断的准确率和智能化程度。

(3) 结合目前先进的信号处理技术、信息融合技术和虚拟技术,研制和开发移植性强,能诊断大型、复杂液压系统故障的智能诊断系统。

总之,随着人工智能技术的发展,研究如何准确地实现自动化、智能化诊断系统就成为摆在学者面前的紧迫任务。信息融合技术为故障诊断提供了一个诊断信息优化的强大工具,研究如何更有效地将信息融合技术应用于液压系统诊断领域,提高诊断系统的智能化程度,是液压系统故障诊断的研究方向。

参考文献

- [1] 林朝桢. 铁谱技术原理及应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1990.

【2】刘忠, 杨国平. 工程机械液压传动原理、故障诊断与排除 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005. 1.

【3】H. Rashidy, et al. A hierarchical neuro-fuzzy system for identification of simultaneous faults in hydraulic servovalves [C]. Proceedings of the 2003 American Control Conference, 2003, 5: 4269 - 4274.

【4】H. Khan, S. Abou, N. Sepehri. Fault detection in electro-hydraulic servo-positioning systems using sequential test of Wald [C]. Proceedings of the 2002 Canadian Conference on Electrical & Computer Engineering, 2002, 3: 1628 - 1633.

【5】H. Khan, S. C. Abou, N. Sepehri. Nonlinear observer-based fault detection technique for electro-hydraulic servo-positioning systems [J]. Mechatronics, 2005, 15 (9): 1037 - 1059.

【6】徐克林, 徐克勇. 智能型液压故障诊断专家系统探讨 [J]. 机电设备, 2001 (5): 10 - 13.

【7】张荣沂, 等. 液压系统故障诊断专家系统 [J]. 工程机械, 2002, 33 (7): 32 - 35.

【8】王芙蓉. 机床液压系统故障诊断专家系统的研究与开发 [J]. 山东理工大学学报: 自然科学版, 2005, 19 (6): 38 - 40.

【9】杜文正, 等. 基于竞争网络的液压系统故障诊断方法 [J]. 液压与气动, 2003 (10): 55 - 57.

【10】刘可伟, 杨兆建. 基于人工神经网络的提升设备故障诊断研究 [J]. 太原理工大学学报, 2002, 33 (4): 441 - 443.

【11】戴智华, 易建钢, 陈新元. 模糊故障树理论在液压系统故障诊断中的应用 [J]. 机床与液压, 2002 (5): 202 - 205.

【12】陈洁, 芮延年. 基于模糊理论液压系统故障诊断方法的研究 [J]. 机电工程, 2003, 20 (6): 67 - 70.

【13】王永昌, 赵静一, 张齐生. 基于故障树分析的橡胶压块机液压系统故障诊断及搜索策略 [J]. 中国机械工程, 2002, 13 (18): 1555 - 1557.

【14】张学富. 灰色理论在液压系统故障诊断及状态监测中的应用 [D]. 上海交通大学, 1995. 1.

【15】陈玉良. 基于灰色理论的液压设备故障诊断 [J]. 液压与气动, 2005 (7): 73 - 75.

【16】杨小强, 肖燕妮, 严骏. 基于案例分析技术的液压系统故障诊断 [J]. 机床与液压, 2005 (1): 190 - 196.

【17】丁贤林, 等. 案例推理在大型轧钢活套液压系统故障诊断中的应用 [J]. 机床与液压, 2003 (5): 247 - 249.

【18】于志伟, 苏宝库, 曾鸣. 基于多智能体的监控与故障诊断技术及其应用 [J]. 计算机工程, 2006, 32 (13): 222 - 224.

【19】王志鹏. 基于信息融合技术的故障诊断方法的研究及应用 [D]. 大连理工大学, 2001. 6.

【20】刘同明, 等. 数据融合技术及其应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

【21】杨小强, 戴鹏飞, 李永新. 基于数据融合与虚拟仪器技术的液压系统故障诊断研究 [J]. 机床与液压, 2004 (7): 177 - 179.

【22】潘兵, 熊静琪. 多传感器信息融合在液压系统智能故障诊断中的应用 [J]. 机床与液压, 2006 (5): 190 - 192.

(上接第 198 页)

图 7 是其自功率谱图。图上只存在两条明显谱线, 即啮合频率 f_m (259Hz) 和谱线 1 (252Hz), 谱线 1 与 f_m 之差为轴的转动频率 7Hz, 是 f_m 被 f_r 调制而产生的一阶下边频带。而存在局部异常的齿轮在频域的故障特征为边频带数目多, 根据图 7 中的边频带特征, 容易误判为齿轮偏心或不同轴。

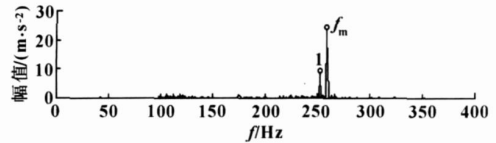


图 7 齿轮故障振动信号的自功率谱图

图 8 是基于高斯复小波变换的相位功率谱图。图中在啮合频率 f_m (259Hz) 周围存在间距为 7Hz 的边频带簇, 如图中标记 1—5 所示, 对应的频率分别为 238Hz, 245Hz, 252Hz, 266Hz, 273Hz。图中的边频带数目多、强度起伏小, 反映出齿轮存在局部缺陷时的频域特征。

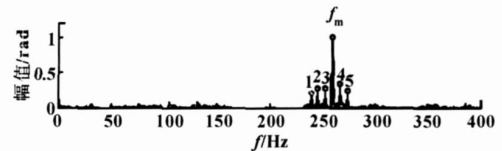


图 8 齿轮故障振动信号的高斯复小波变换相位功率谱图

5 结论

本文作者运用在时域和频域均具有很好的集中性的高斯复小波基函数分析了齿轮仿真振动信号和试验故障振动信号, 其相位的功率谱图可从强噪声干扰中突出边频带结构, 反映出齿轮局部故障的频域特征。同传统的功率谱图相比较, 结果表明了该方法的有效性, 并具有抗噪声能力强的优势。

参考文献

【1】张贤达, 保铮. 非平稳信号分析与处理 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.

【2】张安华. 机电设备状态监测与故障诊断技术 [M]. 西安: 西北工业大学出版社, 1995.

【3】于德介, 成琼. 基于复解析小波变换的瞬时频率分析方法 [J]. 振动与冲击, 2004, 23 (1).