

动车组电力制动气阀强振动特性分析 试验研究

传统的动车组电力制动气阀强振动特性研究,采用海量振动样本特征数据聚类分析方法进行诊断与决策,受到振动数据样本采集和环境的特征的限制,振动特性分析具有不确定性,对强振动下的故障状态分类不准。提出一种基于经验模态分解下谱特征提取的动车组电力制动气阀强振动特性分析方法。首先分析动车组电力制动气阀强振动模式下的工作性能,采集得到强振动信号并进行特征分析和处理,基于经验模态分解方法进行强振动信号的谱特征提取改进,构建振动下的电力制动气阀振动特性诊断专家系统,实现振动特性决策和分析。仿真实验表明,采用该方法进行振动特征研究,能有效去除振动模式下干扰特征的影响,实现对动车组电力制动气阀强振动信号的有效谱特征分析,同时实现对故障和不稳定因素的提前预测和预防,达到有效故障诊断和预防的效果。

管春玲^{1,2}/1.广州铁路职业技术学院轨道交通学院 2.西南交通大学机械工程学院



管春玲/讲师

关键词/Keywords

动车组 ·
电力制动 ·
气阀 ·
振动特性 ·
仿真试验 ·

近几年来,中国高速铁路取得了快速的发展,动车组就是将带动力的动力车与非动力车按照预定的参数组合在一起,随着中国高铁的发展,实现了“四纵四横”铁路快客通道和六大城际快客系统,高速铁路网预计将在2015年和2016年形成网络效应,将为人类的生产生活带来极大的便利。高速铁路运行的列车动车组亦称多动力列车组合(Multiple Units, MU),将动力装置分散安装在每节车厢上,推进列车快速前进,动车组的动力来源分布在列车各个车厢的发动机上,而不是集中在铁路机车上,因此动车组具有快速和动力强的特点,因而受到高速列车的青睐。动车组有两种牵引动力的分布方式:一是动力分散;二是动力集中。正因为动车组

高速运行的特点,对动车组电力制动要求极为严格,动车组的电力制动气阀在强振动下的振动特性研究,是保证整个动车系统安全可靠运行的关键,研究电力制动气阀强振动下的振动特性,实现对动车组电力制动气阀强振动模式的故障状态模式的准确推断决策,在保证动车组和高速铁路安全运行中具有积极重要的意义^[1]。

当前,对动车组电力制动气阀强振动模式的故障状态模式分析和振动特性研究方法主要分为专家系统法、信号分析和处理法以及模糊决策算法等,其中基于信号处理的振动故障分析方法较为典型^[2]。文献[3]提出一种基于单频包络瞬时值统计的高铁动车气阀振动特性试验方法,构建了高速铁路列车运行控制系统模型,进行了通信系统干扰特征建模,提取了振动信号的特征,并进行了振动特性分析,提高故障分析性能,但是该算法存在计算量大、振动信号提取不确定等缺点。文献[4]提出一种基于自适应小波变换的动车组振动系统故障诊断方法,采用平滑算子抑制噪声,在振动特性试验中具有较好的效果,但是采用提升小波变换需要进行多层分解,计算复杂,降低了方法的普适性。文献[5]提出一种基于高阶谱特征分析的动车组制动振动系统的故障分类和振动试验方法,提取的高阶谱不能准确反映故障信号的时频特性,包含信息并不丰富。文献[6]给出动车组电力制动气阀强振动下的振动特性研究方法,采用海量振动样

本特征数据聚类分析方法进行诊断决策,受到振动数据样本采集和环境特征的限制,振动特性分析具有不确定性,对强振动下的故障状态分类不准。

针对上述问题,本文为了试验动车组制动气阀的振动特性,对传统试验研究方法进行改进,克服传统方法的弊端,提出一种基于经验模态分解下谱特征提取的动车组电力制动气阀强振动下的振动特性分析方法。首先分析动车组电力制动气阀强振动模式下的工作性能,采集得到强振动信号并进行特征分析和处理,基于经验模态分解方法进行强振动信号的谱特征提取改进,实现对制动阀的振动特性定量分析,最后进行振动仿真试验,从而得出有效性结论。

动车组电力制动气阀强振动下工作性能和信号采集

1. 动车组电力制动气阀原理及工作性能描述

为了实现对动车组的电力制动气阀在强振动下的特性分析,需要首先分析动车组的电力制动气阀在强振动下的工作特性^[7],动车组的制动系统构造框图如图1所示。

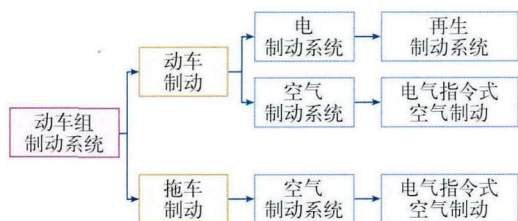


图1 动车组的制动系统构造框图

结合图1,动车组有两种牵引动力的分布方式:一是动力分散;二是动力集中。但实际上,动力集中式的动车组严格上来说只能算是普通的机车+车辆模式的翻版再升级。关于动车组电力制动原理描述如下:在动车组电力制动气阀达到最小流量前制动气阀强振动,为了确保动车组电力制动气阀远离制动气阀强振动线,在防制动气阀强振动控制系统安装了DCS装置;在动车组电力制动气阀进入制动气阀强振动之前,由其控制打开防制动气阀强振动放空阀。利用制动气阀强振动控制器对防制动气阀强振动放空阀进行控

制。一般将稳定与不稳定运行的分界线称为制动气阀强振动线。制动气阀强振动线取决于多种因素(如温度、压力等)。本文通过故障检测设计出网络构建思想,以确保动车组电力制动气阀稳定、安全运行。典型的动车组电力制动气阀实物如图2所示。

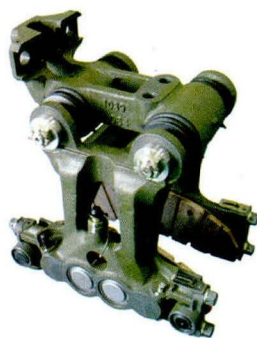


图2 典型的动车组电力制动气阀实物

在动车组制动气阀振动研究工程试验中,设定一段制动气阀强振动流量值为3 450 m³/h,设定二段制动气阀强振动流量值为1 750 m³/h。当动车组电力制动气阀的流量大于制动气阀强振动设定值时,制动气阀强振动放空阀关闭;当小于制动气阀强振动设定值时,制动气阀强振动放空阀打开,电信号为4 mA对应的放开度为100%,20 mA对应的放开度为0。

2. 动车组电力制动气阀的强振动信号采集和分析

根据上述工作原理描述可见,为了实现振动特性试验和故障分析,需要对动车组电力制动气阀的强振动信号进行采集和特征分析,然后进行决策模型构建,包括对模糊数据库、模糊知识库和模糊推理机的构建。设计故障诊断的神经网络模糊控制学习算法^[8-11],是通过设计人机结构,实现对动车组电力制动气阀强振动模式故障的准确推断决策。具体描述如下:

对振动系统的振动数据进行信号模型构建,通过信号处理和特征提取方法,构建故障诊断专家系统,假设动车组电力制动气阀强振动模式的信号数据主要有电流信号、振动信号、差压信号、绝压信号和振动信号,数据集构成形式为

$$X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\} \subset R^s \quad (1)$$

数据集合中含有 n 个电流信号、振动信号、差压信号、绝压信号和振动信号样本, 其中样本 x_i , $i = 1, 2, \dots, n$ 的特征矢量为

$$\mathbf{x}_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{in})^T \quad (2)$$

假设动车组电力制动气阀强振动信号表达式为

$$z(t) = x(t) + iy(t) = a(t)e^{i\theta(t)} \quad (3)$$

其中

$$\begin{aligned} a(t) &= \sqrt{x^2(t) + y^2(t)} \\ \theta(t) &= \arctan \frac{y(t)}{x(t)} \end{aligned} \quad (4)$$

式中, $a(t)$ 和 $\theta(t)$ 分别为解析信号的包络和相位, $a(t)$ 和 $\theta(t)$ 都是动车组电力制动气阀噪声信号的时间序列函数, 得到动车组电力制动气阀强振动信号的解析表达式为 $z(t)$ 是 $x(t)$ 与 $1/t$ 的卷积

$$WD_x(t, f) = \int x(t + \frac{\tau}{2})x^*(t - \frac{\tau}{2})e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (5)$$

将动车组电力制动气阀强振动信号的时域和频域结合在一起, 描述信号各频率分量随时间变化的关系, 构造一个能反映这种时变特性的时频联合分布 $P(t, f)$, 由此提取正常工作时的数据特征, 然后采集故障数据, 得到

$$J_m(U, V) = \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^c \mu_{ik}^m (d_{ik})^2 \quad (6)$$

式中, m 为权重指数; $(d_{ik})^2$ 为样本 x_k 与 V_i 的测度距离, 用欧式距离表示为

$$(d_{ik})^2 = \|x_k - V_i\|^2 \quad (7)$$

使用窄时域窗得到故障信号 $x(t)$ 的短时傅里叶变换为

$$\text{STFT}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h^*(\tau - t)e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (8)$$

分别对每个IMF用Hilbert-Huang变换进行谱分析, 表达式为

$$\sum_{i=1}^c \mu_{ik} = 1 \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

进而得到故障信号 $x(t)$ 的短时傅里叶变换表达式为

$$\text{STFT}(t, f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau)h^*(\tau - t)e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (10)$$

式中, τ 为时间窗函数; f 为频域分解特征。

通过上述分析得到了动车组电力制动气阀的强振动信号采集和特征分析模型, 为进一步进行

制动阀的振动特性分析提供了数据信号基础。

经验模态分解谱特征提取及振动特性分析实现

1. 电力制动气阀强振动信号经验模态分解下谱特征提取

在上述制动阀工作特征分析和信号模型构建的基础上进行制动阀的振动特性分析, 结合传统方法可见, 传统的动车组电力制动气阀强振动下的振动特性研究, 采用海量振动样本特征数据聚类分析方法进行诊断决策, 受到振动数据样本采集和环境特征的限制, 振动特性分析具有不确定性, 对强振动下的故障状态分类不准。提出一种基于经验模态分解下谱特征提取的动车组电力制动气阀强振动下的振动特性分析方法。对于任意原始的动车组电力制动气阀强振动信号 $x(t)$, Hilbert变换式为

$$y(t) = \frac{1}{\pi} P \int \frac{x(\tau)}{t - \tau} d\tau = x(t) \frac{1}{\pi t} \quad (11)$$

为了反映出动车组制动阀的强振动数据类群的多样性特征, 给出Hilbert-Huang变换, Hilbert-Huang变换由经验模态分解和Hilbert谱分析构成, 通过经验模态分解, 将一个复杂的动车组电力制动气阀强振动模式故障信号分解成若干滑动平均采样分量之和, 并利用局部极大值与局部极小值对信号的特征时间尺度进行信号包络连接, 得到包络下平均值为

$$SD = \sum_{i=0}^T \left[\frac{|h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t)|^2}{h_{1(k-1)}^2(t)} \right] \quad (12)$$

上式表示通过频率和幅度调制得到的经验模态分级包络量, 使信号IMF分量保留了原始信号中幅度调制, 此时定义只有频率或幅值调制的故障信号为一个固有模态函数, 通过信号包络幅度调制, 得到动车组电力制动气阀强振动信号的第一个IMF分量为

$$r_1 = x(t) - c_1 \quad (13)$$

根据动车组电力制动气阀强振动信号的时域和频域分析进行振动特性分析的基本模型描述, 得到强振动信号 $x(t)$ 的第 n 个IMF分量, 表达式为

$$\begin{aligned} r_1 - c_2 &= r_2 \\ &\vdots \\ r_{n-1} - c_n &= r_n \end{aligned} \quad (14)$$

实现了电力制动气阀强振动信号经验模态分解下谱特征提取。

2. 振动故障特性分析决策实现

通过改进的经验模态分解方法,将信号分解成多个IMF分量,提取信号的Hilbert谱特征,由此实现了对动车组电力制动气阀强振动模式振动特性分析模型构建。构建振动下的电力制动气阀振动特性诊断专家系统如图3所示。

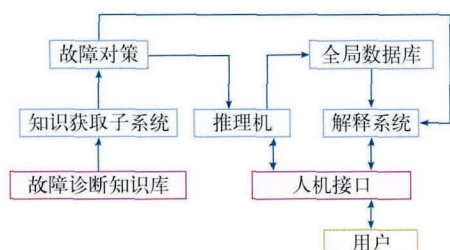


图3 动车组电力制动气阀振动故障诊断专家系统基本结构

动车组电力制动气阀振动故障诊断专家系统的输出向量为 $\mathbf{B}_k = (b_1, b_2, \dots, b_p)$,计算多样性因子 m_f 并与阈值进行比较,与故障诊断专家系统连接权值为 v_{jt} , $j=1, 2, \dots, p$; $t=1, 2, \dots, q$ 。对应的动车组电力制动气阀故障特征实际输出为

$$Y_k = [y_{k1}, y_{k2}, \dots, y_{kj}, \dots, y_{kq}] \quad k=1, 2, \dots, N \quad (15)$$

期望输出为

$$d_k = [d_{k1}, d_{k2}, \dots, d_{kj}, \dots, d_{kq}] \quad k=1, 2, \dots, N \quad (16)$$

振动特性试验仿真及结果分析

为了测试本文在实现动车组电力制动气阀强振动下的振动特性分析研究,进行仿真实验,并采用abaqus软件进行仿真分析。本文将abaqus软件引用到故障诊断系统模型分析中,构建模糊数据库、模糊知识库和模糊推理机,在专家系统硬件设计中,通过abaqus软件使用网线、232串口和USB等方式将程序下载至嵌入式系统中实现专家诊断系统的性能测试。根据规则库和事实库程序完成模式匹配,将其放入议程,最终完成推理和振动特性分析的专家决策。在振动特性试验中,

动车组电力制动气阀在加负荷提压时,其出口阀FV2011及副线阀一直处于关闭状态,憋压导致动车组电力制动气阀一段出口压力迅速上升,当达到1.5 MPa以上时,造成动车组电力制动气阀一、二制动气阀强振动放空阀突然打开,紧接着汽轮机转速迅速达到电子跳闸转速,从而跳车。在上述试验环境下,进行强振动信号采集,得到信号模型如图4所示。

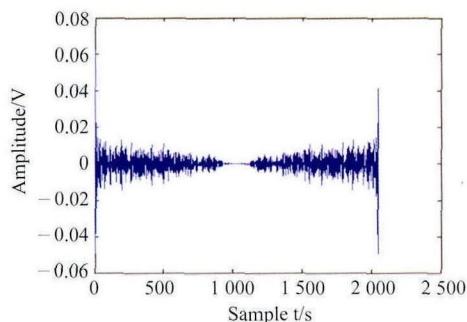


图4 动车组电力制动气阀强振动信号采集

以上述信号模型为研究样本进行电力制动气阀强振动信号经验模态分解下谱特征提取,分析其谱特征,实现振动特性分析,为了对比算法性能采用本文模型和传统模型对强振动信号进行特征分析,得到结果如图5所示。图5a为传统模型的电力制动气阀强振动信号分析结果,图5b为本文方法的分析结果。从图中可见,采用本文方法能有效去除干扰特征的影响,实现对动车组电力制动气阀强振动信号的有效特征分析,并实现提前预测和预防,可以达到有效的故障诊断和预防的目的,提高动车运行的振动稳定性。

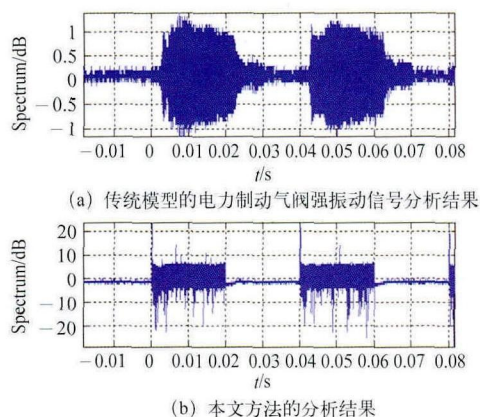


图5 动车组电力制动气阀强振动信号特征分析结果

结束语

动车组高速运行, 电力制动气阀容易产生故障, 需要进行振动特性试验分析和研究, 提高动车组的稳定运行性能。研究电力制动气阀强振动下的振动特性问题, 实现对动车组电力制动气阀强振动模式的故障状态模式的准确推断决策。传统的动车组电力制动气阀强振动下的振动特性研究, 采用海量振动样本特征数据聚类分析方法进行诊断决策, 受到振动数据样本采集和环境特征的限制, 振动特性分析具有不确定性, 对强振动下的故障状态分类不准。提出一种基于经验模态分解下谱特征提取的动车组电力制动气阀强振动下的振动特性分析方法。首先分析动车组电力制动气阀强振动模式下的工作性能, 采集得到强振动信号并进行特征分析和处理, 基于经验模态分解方法进行强振动信号的谱特征提取改进, 实现对制动阀的振动特性定量分析。试验分析得出, 采用本文方法能有效去除干扰特征的影响, 实现对动车组电力制动气阀强振动信号的有效特征分析, 并实现提前预测和预防, 可以达到有效的故障诊断和预防的目的, 提高系统的振动特性。

参考文献

- [1] 张毅, 周丙寅. 井下直线电机泵故障检测仪硬件系统设计 [J]. 计算机与数字工程, 2012, 40 (11): 162-166.
- [2] 吕勇, 李友荣, 王志刚. 基于经验模式分解的轧机主传动减速机故障诊断 [J]. 振动、测试与诊断, 2007, 27 (2): 112-116.
- [3] 苑宇, 马孝江. 局域波时频域多重分形在故障诊断中的应用 [J]. 振动与冲击, 2007, 26 (5): 60-63.
- [4] 李良敏, 温广瑞. 基于遗传算法的多尺度支持向量机及其在机械故障诊断中的应用 [J]. 机械科学与技术, 2008, 27 (8): 1101-1106.
- [5] 张强. 基于PPCA的旋转机械故障识别算法 [J]. 计算机仿真, 2011, 28 (12): 335-338.
- [6] 敖星, 吕俊峰, 赵孟娜. 基于主成分分析和多元支持向量机的旋转机械故障诊断方法 [J]. 四川兵工学报, 2010, 31 (9): 83-86.
- [7] 孙岩, 吕世聘, 唐一源. 无先序条件约束的KNN算法 [J]. 小型微型计算机系统, 2008, 29 (4): 682-686.
- [8] 张毅, 盛会平. 基于相空间重构和K-L变换的压缩机故障诊断 [J]. 压缩机技术, 2011 (4): 19-21.
- [9] Gareth Jones¹, Emma C Teeling, The evolution of echolocation in bats [J]. TRENDS in Ecology and Evolution, 2006, 21 (3): 149-156.
- [10] Ayub M, Tiwana M H, Mann A B. Propagation of sound in duct with mean flow [J]. Commun Nonlinear Sci Numer Simulat, 2009 (14): 3578-3590.
- [11] Liang Hong, Hong Kang, Yang Changsheng. Lattice structure adaptive IIR notch filter based on least square kurtosis [J]. Systems Engineering and Electronics, 2009, 20 (6): 1188-1192.

(收稿日期: 2014-12-15) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告