

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2020.08.014

转子不平衡故障模拟及其不平衡 响应测量分析平台研究^{*}

汪爱明¹, 张天硕¹, 姚 伟^{1,2}, 沙 涛³, 葛 甜¹, 张子阳¹

(1. 中国矿业大学(北京)机电与信息工程学院, 北京 100083; 2. 国家能源宁夏煤业集团有限责任公司, 宁夏 银川 750011; 3. 内蒙古电力(集团)有限责任公司乌兰察布电业局, 内蒙古 乌兰察布 012000)

摘要:针对难以通过在现场大型旋转机械上预设不平衡,研究不平衡量辨识方法问题,研发了转子不平衡故障模拟试验台及转子不平衡响应测量分析系统。研制了由无刷直流电动机及其驱动器、滚动轴承、转轴、偏心转盘等组成的轴承-转子系统,通过改变配重在转盘上的安装位置模拟了转子不平衡故障;设计了由电涡流传感器、光电传感器、数据采集卡等组成的测量与分析系统硬件,利用 LabVIEW 开发了基于截取脉冲分析法的转子不平衡响应测量与分析系统专用软件,实现了转子键相脉冲和不平衡响应信号的采集与存储以及不平衡响应幅值和相位的分析;考虑测量噪声,设计了基于 LabVIEW 的仿真实验。研究结果表明:截取分析的周期不同,识别误差也不同,但幅值相对误差最大为 2.023 9%,相位绝对误差最大为 2.441 9°。

关键词:轴承-转子系统;不平衡量辨识;故障模拟;不平衡响应测量分析

中图分类号:TH877;TH113.1

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2020)08-0936-05

Fault simulation of rotor unbalance and unbalance responses test analysis platform

WANG Ai-ming¹, ZHANG Tian-shuo¹, YAO Wei^{1,2}, SHA Tao³, GE Tian¹, ZHANG Zi-yang¹

(1. School of mechanical Electrical and Information Engineering, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China; 2. China Energy Ningxia Coal Industry Group Co., Ltd., Ningxia 750011, China; 3. Wulanchabu Electric Power Bureau of Inner Mongolia Electric Power(Group) Co., Ltd., Wulanchabu 012000, China)

Abstract: Aiming at the problem that it is very difficult to study the rotor unbalance identification problem using measured unbalance responses by applying unbalance to large rotating machineries experimentally, a rotor unbalance fault simulation and vibration test and analysis platform was developed. The rotor-bearing system was developed by using a DC motor and its driver, rolling bearing, shaft, eccentric disc and so on. The rotor unbalance fault was simulated by changing the installation position of the counterweight in the disc. The hardware of the vibration test and analysis platform was designed by using eddy current displacement sensor, photoelectric sensor, data acquisition card and so on. Moreover, a measurement and analysis software of the unbalance response was developed based on the method of intercepting pulse analysis by using LabVIEW. The unbalance response of the shaft and one key-phase pulse signal was synchronously acquired. The acquired data was saved in the computer, the amplitude and phase of the unbalance response was identified. Considering the measurement noise, a simulation experiment based on LabVIEW was designed. The results indicate that the amplitude and phase of the unbalance response can be identified correctly. The identification error is different with different intercepted analysis periods, the maximum relative error of amplitude is 2.023 9%, and the maximum absolute error of phase is 2.441 9°.

Key words: bearing-rotor system; unbalance identification; fault simulation; vibration test and analysis of unbalance response

收稿日期:2019-11-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFC0600907);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(00/800015HJ)

作者简介:汪爱明(1982-),男,江苏南通人,副教授,主要从事转子动力学、设备监测监控等方面的研究。E-mail:wam_master@163.com

0 引言

大型旋转机械,如矿井主扇风机、矿井主排水泵、汽轮发电机组、透平压缩机组等,在煤炭、电力等工业领域广泛使用,并发挥着重要作用。转子系统是旋转机械的核心部件,原实验室平衡好的转子在安装、运行、维修等过程中,由于安装误差及工作过程中产生的磨损、热变形、介质粘附等问题,不可避免地出现二次不平衡问题。

转子不平衡是引起旋转机械剧烈振动,加快零件磨损,降低工作效率,甚至导致停机、停产、机毁人亡恶性事故的主要因素^[1-2]。转子动平衡技术可以有效降低不平衡引起的振动,不平衡量辨识是该技术的关键,但一直没有得到很好地解决。

大型旋转机械通常是生产中连续运行的关键设备。在该类设备上预设不平衡,搭建测试系统,人为多次起停机,直接提取转子不平衡导致的不平衡响应;进而实验研究不平衡量辨识问题是非常困难的,而且既不经济也不实际。

目前,大多数研究都是基于市场上现成的转子实验台,研究转子各类故障机理、故障特征指标、故障诊断算法等。但该方法存在两个问题:一方面,价格高;另一方面,转子振动分析软件输出结果的准确性有待提高。对于转子不平衡量辨识,准确识别振动相位信息至关重要。文献[3]提出了振动信号 DTFT 和软测量相位测量方法,该方法只适用于低频振动信号,计算量较大;文献[4-5]提出了锁相环技术,实现键信号和振动信号的同步测量,结合 DFT 或 FFT 算法提取振动相位;文献[6]提出了利用小波分析对原始振动信号降噪,以期提高振动相位识别的准确性;文献[7]提出了截取脉冲分析法,即通过截取若干个键相脉冲以及与之对应的不平衡响应信号,实现软件同步,分析不平衡幅值和相位。

考虑到 LabVIEW 广泛应用于设备振动数据的采集、分析^[8-13],且具有开发周期短、分析工具包丰富等特点,笔者自主研发转子不平衡故障模拟平台,利用 LabVIEW,开发基于截取脉冲分析方法的转子不平衡响应测量分析系统,为实验研究不平衡量辨识方法提供平台支持。

1 转子实验台

转子实验台结构如图 1 所示。

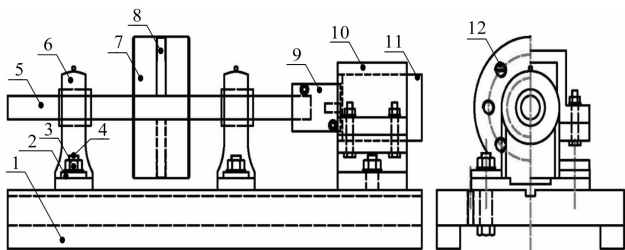


图1 转子实验台结构

1—刚性基础;2—平垫圈;3—螺母;4—螺栓;5—转轴;6—轴承;7—转盘;8—螺钉;9—联轴器;10—电机支架;11—电机;12—配重螺杆

转子实验台主要部件选型如表 1 所示。

表 1 转子实验台主要部件选型

无刷直流电动机	联轴器	滚动轴承	配重螺杆	转轴
57BLF02	CFC-40 × 55-8 × 20	UCPH204	M12 × 100	Φ20

转子实验台主要由:电机、联轴器、转轴、转盘、轴承、配重螺杆等组成。实验台采用螺栓连接固定于刚性基础上。

转盘采用顶丝方式固定于转轴上,转盘周向均布 8 个螺纹孔(键相标记处为 0°),用于安装配重螺杆,实现不同偏心的设置。

2 转子振动测量系统

测量系统对转子转轴振动和键相脉冲信号同时进行采集、保存与分析,辨识转子不平衡响应幅值和相位。

系统主要包括:信号采集与保存模块、信号回放与分析模块。信号采集与保存模块同时采集键相脉冲信号、轴振信号,并保存为 TDMS 文件格式。信号回放与分析模块读取测点不平衡响应和键相脉冲信号,进行回放和分析,得到由不平衡量导致的不平衡响应幅值和相位,并保存为 txt 文件格式,为研究不平衡量辨识算法提供数据支持。

2.1 硬件设计

笔者设计的转子振动测量系统组成如图 2 所示。

系统由上位机、键相传感器、信号采集与电机调速模块、电涡流传感器 4 部分组成。传感器通过航空接头与信号采集模块连接,信号采集模块通过 USB 数据线与上位机连接,采集键相脉冲信号和轴振信号,通过手动旋钮对电机进行调速。

该转子振动测量系统主要电气元件选型如表 2 所示。

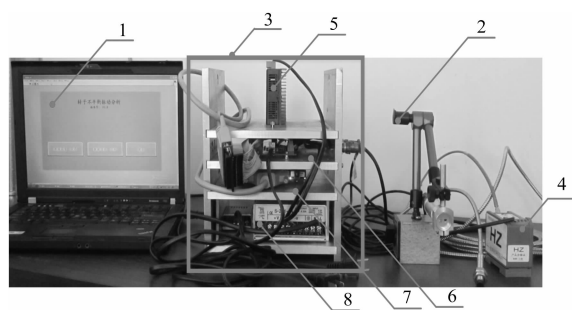


图 2 测量系统组成

1—上位机;2—键相传感器;3—信号采集与电机调速模块;4—电涡流位移传感器;5—无刷直流电动机驱动器;6—信号调理板;7—数据采集卡;8—电源

表 2 主要电气元件选型

电涡流传感器	键相传感器	无刷直流电动机驱动器	数据采集卡	电源
探头型号: HZ310502-000-80-50-00-01-01 前置器型号: HZ310508-50-01-02	GT-1 型光电传感器	BLDC-5015 A	USB 2080	24 VDC、5 VDC 双路输出开关电源

(1) 电涡流传感器。测轴径向振动时,一般要求被测转轴与探头直径的比值大于 3,否则灵敏度就会下降。该系统选用四川率音电子科技有限公司 HZ3100 系列电涡流位移传感器,探头型号: HZ310502-000-80-50-00-01-01,探头直径为 5 mm,前置器型号: HZ310508-50-01-02。它采用 24VDC 电源,量程 2 mm,输出 4 mA ~ 20 mA 电流信号;

(2) 键相传感器。键相传感器采用南京中大趋势测控设备有限公司 GT-1 型光电传感器,其采用 5 VDC ~ 15 VDC 电源,测量最大转频为 200 Hz。该系统采用 5 VDC 供电。为了安装方便,笔者采用万向磁性表座将传感器固定于基础上;

(3) 信号采集与电机调速模块。信号采集与电机调速模块由无刷直流电动机驱动器、信号调理板、数据采集卡和电源组成。笔者选用常州万泰电机有限公司 BLDC-5015A 驱动器,其提供了电位器和模拟量输入端子两种调速方式,最大转速达 8 000 r/min;信号调理板为自制,其给传感器提供 +5 VDC 和 +24 VDC 电源并接受传感器信号,将电涡流传感器输出 4 mA ~ 20 mA 电流信号转换为 1 VDC ~ 5 VDC 电压信号,通过 DB37 针连接线与数据采集卡连接,将传感器信号传至采卡;为了有效抑制共模干扰信号,提高采集精度,信号调理板设计成模拟电压双端输入方式。数据采集卡为北京阿尔泰科技发展有限公司的 USB2080 采卡,采样频率可达 250 kHz。

2.2 软件设计

系统软件由信号采集与保存模块、信号回放与分析模块组成:

(1) 信号采集与保存模块。

信号采集与保存模块实现了键相脉冲信号、轴振信号的采集与保存功能,其流程如图 3 所示。

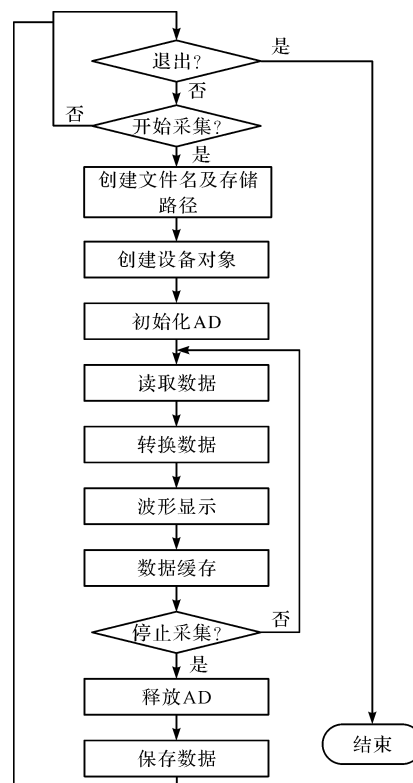


图 3 数据采集与保存模块程序流程

信号采集部分采用 USB2080 采集卡配有的专用接口函数开发。

AD 采集函数驱动接口函数描述如表 3 所示。

表 3 AD 采集函数驱动接口函数描述

Create Device	Release Device	Init DeviceAD	Read DeviceAD	Release DeviceAD
创建 USB 总线设备对象	关闭设备, 且释放 USB 总线设备对象	初始化 USB 设备 AD 部件准备传数	连续批量读取 USB 设备上的 AD 数据	释放 USB 设备对象中的 AD 部件

一个 AD 采集必须的流程为:

首先用 CreateDevice 函数创建一个设备对象句柄 hDevice, 然后 InitDeviceAD 函数使用 hDevice 句柄初始化设备的 AD 部件并启动 AD 设备, 接着 ReadDeviceAD 函数用 hDevice 句柄实现对 AD 数据的采样批量读取, 再接着 ReleaseDeviceAD 函数使用 hDevice 句柄释放设备对象的 AD 部件, 最后通过 ReleaseDevice 将 hDevice 释放掉。

USB2080 采集的二进制数需要转换为对应的电压

值进行存储。在该系统中,USB2080 量程选择为 $\pm 5\text{ V}$, 从设备中读取的 AD 端口数据为 $AD\ Buffer$ 。

根据 USB2080 采集卡驱动程序的使用说明书可知,二进制数转换为电压的公式为:

$$V = \frac{10\ 000}{16\ 384} \times ((ADBuffer \times 0X2\ 000) \&0X3FFF) - 5\ 000 \quad (1)$$

LabVIEW 提供了一种比较高效的、专门用于信号数据存储的文件格式—TDMS。使用者只需设置好文件、通道组和通道即可迅速地保存和读取信号数据。

(2) 信号回放与分析模块。

信号回放与分析模块得到由配重导致的不平衡响应幅值和相位,其程序流程如图 4 所示。

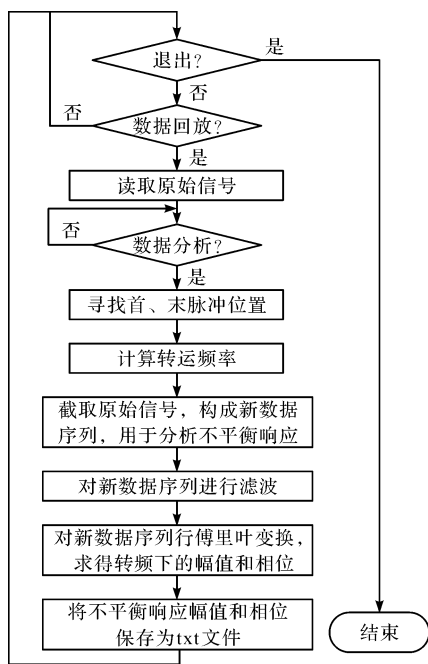


图4 信号回放与分析模块程序流程

目前,相位的测量往往是使用硬件触发控制采样,这需要在信号进入 AD 板前对键相信号作整形处理,导致额外的硬件投资,并增加了误差源。基于此,笔者对键相信号和振动信号同时进行采样、存盘后再读取,分析得到不平衡幅值和相位。

准确识别由不平衡量引起的转频的振动的幅值和相位是识别转子不平衡量的关键。不平衡响应相位为从键相脉冲前沿到振动高点之间的相位角。

依据截取脉冲分析方法基本原理:首先获取 r 个键相脉冲信号以及对应振动信号,然后利用该脉冲信号求得转动频率,接着对振动信号进行傅里叶变换得到幅频和相频信息(由于噪声的存在,必然存在很多频率成分,但关心的为转动频率成分),最后查找转动频率下的幅值和相位,即为不平衡响应幅值和相位。

基于以上思路,笔者设置步骤为:

(1) 以键相脉冲信号前沿为基准,找到第 n 个脉冲前沿在样本序列中的位置 X_n ,找到第 $n+r$ 个脉冲前沿在样本序列中的位置 X_{n+r} ;

(2) 读取原始 4 路振动信号采样序列中 X_n 至 X_{n+r} 之间的数据,得到待分析的 4 个新振动样本序列;

(3) 计算转动频率,对 4 个新振动样本序列进行滤波和傅里叶变换,得到幅值数据和相位数据;

(4) 找到转频所对应的幅值和相位。

笔者利用 LabVIEW 中的瞬态特性测量 VI 和解除捆绑 VI 开发了寻找设定的首、末脉冲前沿的采用点数序列程序如图 5 所示。

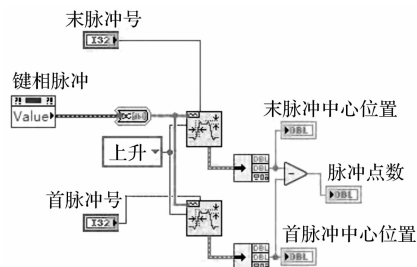


图5 寻找脉冲前沿序列位置

笔者利用 LabVIEW 中的幅度谱和相位谱 VI 和索引数组 VI 开发的计算不平衡导致振动的幅值和相位程序,如图 6 所示。

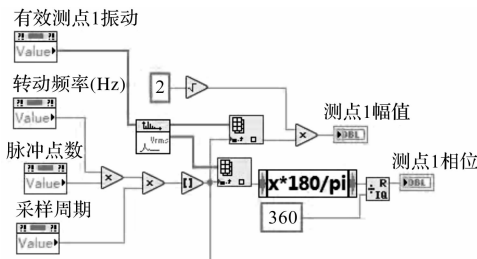


图6 计算测点1不平衡幅值和相位

转频的计算方法公式见下式:

$$f = \frac{1}{t(X_{n+r} - X_n)} = \frac{r}{(X_{n+r} - X_n)t} \quad (2)$$

式中: r —脉冲个数; X_n —截取脉冲时首位的采样点数字号; X_{n+r} —截取脉冲时末位的采样点数字号; t —采样周期。

分析得到的振动幅值和相位信息须保存为 txt 文件,方便 MATLAB 调用,实现不平衡量的识别。

另外,信号回放和分析模块分析得到的不平衡响应振动幅值和相位保存为 txt 文件。但幅值数据为未经转化电压值,单位为 mV。因此,后续的研究在读取该 txt 文件后,必须根据电涡流传感器位移特性曲线,将其转换为振动位移。

3 实验及结果分析

笔者通过 LabVIEW 编写仿真信号生成软件,生成同频率的 1 个脉冲信号和 4 个正弦信号,分别包括不含噪声的仿真信号和含有噪声的仿真信号,并保存为 tdms 格式文件;仿真得到 4 个测点的正弦信号,转化为余弦后分别可表示成 $10 \angle 360^\circ$ 、 $20 \angle 300^\circ$ 、 $30 \angle 310^\circ$ 和 $40 \angle 320^\circ$;将信号导入到信号回放与分析模块。

其识别幅值相对误差和相位绝对误差如表 4 所示。

表 4 振动幅值相对误差和相位绝对误差计算结果

截取的周期	误差	测点 1	测点 2	测点 3	测点 4
取 1—2, 无噪声	幅值	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	相位	0.827 4	0.827 4	0.827 4	0.827 4
取 1—2, 有噪声	幅值	2.023 9	0.099 3	0.627 4	0.407 4
	相位	1.963 7	1.189 2	0.732 3	0.768 0
取 2—4, 无噪声	幅值	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	相位	0.827 4	0.827 4	0.827 4	0.827 4
取 2—4, 有噪声	幅值	1.030 9	0.141 8	0.191 7	0.341 0
	相位	1.074 0	0.162 6	1.005 5	0.752 9
取 3—8, 无噪声	幅值	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	相位	0.827 4	0.827 4	0.827 4	0.827 4
取 3—8, 有噪声	幅值	0.342 3	0.159 1	0.132 8	0.079 7
	相位	1.124 2	0.584 1	0.959 1	0.737 3
取 6—7, 无噪声	幅值	0.000 0	0.000 0	0.000 0	0.000 0
	相位	0.827 4	0.827 4	0.827 4	0.827 4
取 6—7, 有噪声	幅值	0.186 6	0.729 9	0.533 3	0.034 6
	相位	2.441 9	0.567 2	0.483 1	0.882 2

由表 4 可知:当输入信号没有噪声时,幅值相对误差均为 0%,相位绝对误差均为 $0.827 4^\circ$;当输入信号存在噪声时,截取周期不同,识别误差也不同,但幅值相对误差最大为 2.023 9%,相位绝对误差最大为 $2.441 9^\circ$ 。

以上结果表明,只要输入数据包含了该频率成分的信息,截取脉冲分析方法就能够将其准确识别出来,因此,可以认为该截取脉冲法是可行的。

4 结束语

本研究设计了可以模拟不平衡故障的轴承-转子实验台,利用 LabVIEW 设计了基于截取脉冲分析法的转子不平衡响应测量与分析系统,实现了采集、存储转子键相脉冲和转轴不平衡响应信号,以及分析不平衡

响应幅值相位;设计了基于 LabVIEW 的仿真实验。

仿真实验结果表明:截取分析的周期不同,识别误差也不同,但幅值相对误差最大为 2.023 9%,相位绝对误差最大为 $2.441 9^\circ$ 。

该转子不平衡故障模拟及不平衡响应测量分析平台为实验研究转子不平衡辨识算法提供了支持。平台不仅可以用于转子动力学方面的实验室研究,也可以用于现场转子系统的工况在线监测,具有一定的工程应用价值。

参考文献 (References):

- [1] 韩捷,张瑞林. 旋转机械故障机理及诊断技术[M]. 北京:机械工业出版社,1997.
- [2] 寇惠,付润兰,原培新. 故障诊断的振动理论基础[M]. 北京:冶金工业出版社,1989.
- [3] 林可. 旋转机械振动状态监测中的不平衡量相位提取方法[J]. 电子设计工程,2011,19(14):51-53.
- [4] 张海涛,涂亚庆. 基于 DTFT 的一种低频振动信号相位差测量新方法[J]. 振动工程学报,2007(2):180-184.
- [5] 白志刚,唐贵基. 一种转子动不平衡信号幅相特征的提取方法[J]. 电力科学与工程,2002(4):69-70.
- [6] 华容,顾幸生. 基于小波分析旋转机械转子振动信号的相位测量[J]. 华东理工大学学报:自然科学版,2008,34(6):887-891.
- [7] 王晓升,屈梁生. 柔性转子键相信号初始相位及振动信号相位的确定[J]. 振动、测试与诊断,1996,16(3):15-21.
- [8] 解艳. 基于 LabVIEW 的轨道交通数据采集系统设计与实现分析[J]. 电子设计工程,2019,27(15):82-85.
- [9] 刘晓初,许铭璠. 基于 LabVIEW 与 MATLAB 的多通道数据采集与分析系统[J]. 机电工程技术,2019,48(4):127-130.
- [10] 刘小虎,唐勇. 一种基于 LabVIEW 的数据采集系统的实现[J]. 舰船电子工程,2019,39(2):115-117,145.
- [11] 肖艳华,唐求,林海军. 基于 LabVIEW 的多通道噪声倍频程分析系统[J]. 仪表技术与传感器,2017(12):76-81.
- [12] 严展鸿,廖平. 基于 LabVIEW 的大型转子监测及故障诊断系统[J]. 仪表技术与传感器,2017(11):51-55.
- [13] 蔡燕,孙斌,姜文涛,等. 基于 LabVIEW 的电机实时在线监测系统设计与实现[J]. 仪表技术与传感器,2017(10):70-73.

[编辑:方越婷]

本文引用格式:

汪爱明,张天硕,姚伟,等. 转子不平衡故障模拟及其不平衡响应测量分析平台研究[J]. 机电工程,2020,37(8):936-940.

WANG Ai-ming, ZHANG Tian-shuo, YAO Wei, et al. Fault simulation of rotor unbalance and unbalance responses test and analysis platform[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2020,37(8):936-940.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>