

# 手机移动平台的虚拟轴承诊断仪的开发及应用<sup>\*</sup>

尹爱军<sup>1</sup>, 张泉<sup>1</sup>, 孙兵<sup>2</sup>

(1. 重庆大学机械传动国家重点实验室 重庆, 400044) (2. 华能沁北发电有限责任公司检修部 济源, 459012)

**摘要** 针对传统检测分析仪器携带不便、测试效率低和受空间限制等问题, 讨论并实现了基于手机移动终端的虚拟仪器开发原理和方法。分析了 Android NDK 技术, 研究了 Android 平台编程技术和无线蓝牙传输技术, 探讨了 Android 系统中的跨平台虚拟仪器开发原理, 构建了该平台下虚拟仪器系统构架, 开发了基于手机移动平台的虚拟式轴承诊断仪。对开发的仪器进行了现场试验, 并与 LabVIEW 进行了对比。结果表明, 该仪器使用便捷, 分析结果准确, 具有较好的实际应用效果。

**关键词** 虚拟仪器; 手机; Android; 轴承; 故障诊断

**中图分类号** TH7; TP3

## 引言

机械装备广泛应用于生产制造、冶金和化工等行业, 一旦装备出现问题, 将会影响生产, 甚至导致灾难性后果。因此, 装备故障诊断, 特别是在线诊断具有重要的意义<sup>[1-3]</sup>。传统机械故障诊断系统一般基于 PC 机或嵌入式计算机平台, 易受数据有线传输束缚或供电等问题影响, 且总体上仪器系统体积较大、成本高, 在面对复杂的野外测试环境和测试要求时, 此类系统携带不便, 测试效率低。

随着科技的进步, 手机的 CPU 频率和存储容量等性能已经与中端计算机相媲美, 可以完成较复杂的数据处理等功能, 其应用已经不仅仅限于通信, 而是作为通用的移动终端得到越来越广泛的应用。目前, 基于手机平台的检测仪器已得到较多的应用: a. 日常生活, 如便捷式手机医疗仪器; b. 生产测量, 如气体(液体)浓度的测量、区域面积测量和视觉测量等<sup>[4-5]</sup>; c. 科研工作, 如离子浓度的测量和有色液体(固体)成分确定等。从这些研究和应用可以看出, 基于手机移动平台的检测仪器进一步解放了仪器的应用范围和场合, 真正实现测量的灵活性, 摆脱自然条件及空间上的束缚, 提高了检测效率和时效性<sup>[6]</sup>。因此, 基于手机移动终端的检测仪器必将成为仪器技术发展的新潮流。

轴承是机械装备中的关键部件, 其在役状态检测与诊断对保证装备安全可靠运行具有重要意

义<sup>[7-8]</sup>。笔者研究了 Android 系统中的虚拟仪器开发技术, 论述了跨平台仪器开发原理, 利用蓝牙技术实现了实时数据的采集和传输, 开发了手机虚拟式轴承诊断仪, 并通过对比试验验证了仪器的有效性。该仪器融合了手机移动终端和虚拟仪器的特点, 促进了检测仪器向移动平台的新发展, 真正实现了检测仪器的便捷性, 提高测试的效率。

## 1 系统结构

### 1.1 系统构架

Android 操作系统因其开源等优势, 广泛应用于手机等移动终端<sup>[9]</sup>。笔者开发的手机虚拟仪器基于 Android 平台, 其系统结构如图 1 所示。数据感知终端(下位机)对传感器信号进行调理并采集, 然后通过蓝牙/Wi-Fi 等通信方式将数据发送到手机终端进行分析处理。手机(上位机)虚拟仪器接收数据进行分析处理, 主要功能模块包括通信模块、数据分析处理模块和结果图形化显示等。

### 1.2 跨平台开发原理

基于手机平台的虚拟仪器开发主要利用了 Android NDK 中的 JNI(Java native interface)技术<sup>[10]</sup>和基于 C 语言的信号分析处理跨平台开发技术, 开发原理如图 2 所示。

在 Android 操作系统中, 采用 Java 设计语言,

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金资助项目(51105396)

收稿日期: 2013-10-21; 修回日期: 2013-12-25

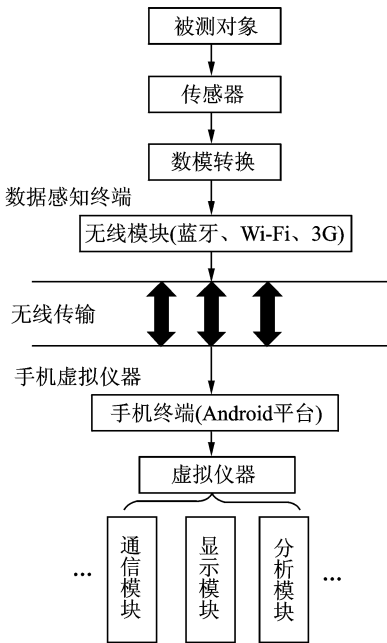


图 1 系统架构图  
Fig.1 System architecture

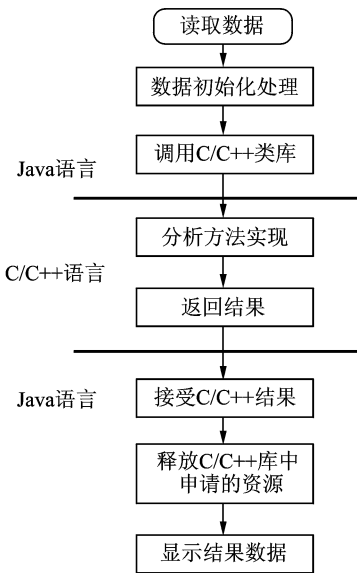


图 2 跨平台开发原理  
Fig.2 Cross-platform development principle

通过 Android NDK 进行仪器控制和用户界面层程序开发。仪器分析处理功能,采用 C 语言开发。利用 Android NDK 中的 Libraries & JNI 模块,实现了 Java 界面层和仪器算法功能之间的交互,并将分析层的分析处理结果返回给 Java 界面层显示输出。图 3 为 JNI 调用示意图。

在这种跨平台开发模式下,因为 C/C++ 语言所编写的分析程序,效率比用纯粹 Java 语言编写的程序效率高;同时,采用 JNI 技术后,代码不是在 Ja-

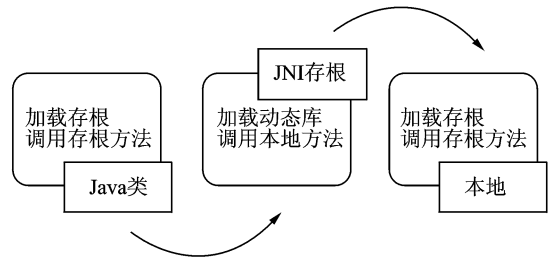


图 3 JNI 调用过程示意图  
Fig.3 Schematic calling process of JNI

va 虚拟机中运行,而是在系统底层直接运行,使得运行效率进一步提高。因此,跨平台开发保证了手机虚拟仪器具有较高的运算速度。

## 2 Android 平台测试仪器开发

### 2.1 跨平台信号分析模块开发

轴承在运行过程中,装配不当、润滑不良和过载等因素都可能导致轴承过早损伤而出现故障。轴承故障形式有疲劳、磨损、塑性变形和胶合等<sup>[8]</sup>。当轴承出现疲劳剥落后,在其频谱的中高频区外环固有频率附近出现明显的调制峰群;同时轴承的不同部件将表现出不同的故障频率,因此可以根据故障特征频率进行轴承状态检测。设主轴旋转频率为

$$f_s = \frac{n}{60}$$

其中: $n$  为轴承转速。

内圈通过频率为

$$f_i = f_s \cdot \frac{N}{2} (1 + \frac{d_o}{D} \cos\alpha) \quad (1)$$

其中: $N$  为滚动体个数; $d_o$  为滚动体直径; $D$  为轴承节径; $\alpha$  为接触角。

外圈通过频率为

$$f_o = f_s \cdot \frac{N}{2} (1 - \frac{d_o}{D} \cos\alpha) \quad (2)$$

滚动体通过频率为

$$f_b = f_s \cdot \frac{D}{2d_o} \left[ 1 - \left( \frac{d_o}{D} \right)^2 \cos^2\alpha \right] \quad (3)$$

在轴承故障分析诊断中,时域统计特征参数,如峰值、峭度、方差、均方根值及脉冲因子等指标得到较广泛的应用。均方根值稳定性强,能够对表面裂纹有较好的预测。峭度、峰值和脉冲等指标表征了振动能量的大小,对早期轴承故障足够敏感<sup>[11]</sup>。为了更准确地评估故障状态,功率谱分析、解调包络谱和小波分析等方法得到了广泛的研究和应用<sup>[12-14]</sup>。针对轴承故障信号特点,笔者开发了信号时域波形

分析、统计特性分析(如峰值、峭度、方差、裕度、脉冲因子等)、频谱分析(如功率谱、倒频谱、小波分析等)及解调分析(希尔伯特解包络分析、包络谱等)等模块。

### 2.2 双缓冲绘图机制与显示模块开发

在 Android 系统中,有两种绘图模式:由独立线程绘图;在主线程中直接绘图。当在主线程中绘图时,会因更新画面时间过长,导致主线程阻塞,从而无法响应其他事件(如按键操作等),且易出现画面闪烁等现象。因此,笔者采用 Android 中的 Surface View 多线程双缓冲绘图机制,其原理如图 4 所示。

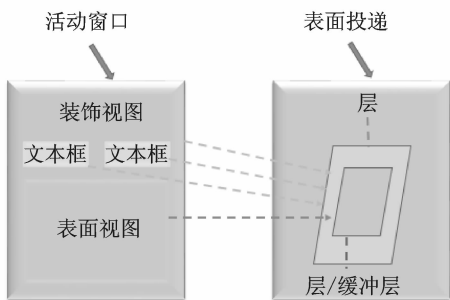


图 4 Surface view 原理

Fig. 4 The principle of surface view

图 4 中,Activity Window 包含 Decor View, Text View 以及 Surface View 三种视图。Surface Flinger 运行于 Android 系统进程中,负责管理 Android 的帧缓冲区(frame buffer)。Activity Window 中的 Decor View 和 Text View 对应 Surface Flinger 中一个 Layer,而 Surface View 对应另一个独立的 Layer 或 Layer Buffer。同时,Activity Window 中可以有多个 Surface View 实例,而每一个 Surface View 实例在 Surface Flinger 都有一个独立的 Layer 分别用来描述各自的绘图属性。因 Surface View 为独立的绘图线程,从而提高了应用程序的响应速度。在双缓冲绘图模式下,显示模块工作的流程如图 5 所示。

### 2.3 基于蓝牙通信的数据采集与传输

传统检测仪器的数据传输大都是通过有线连接实现的,在传输过程中受到空间上的限制。为了让检测更加灵活、便捷;且手机一般都自带有蓝牙通信功能,因此笔者所开发的仪器首先通过下位机进行信号调理和采集,然后通过蓝牙模块与手机进行蓝牙通信,实现振动信号的实时传输和处理<sup>[15]</sup>。Android 蓝牙通信流程所图 6 所示。

笔者开发的手机虚拟仪器系统如图 7 所示。其

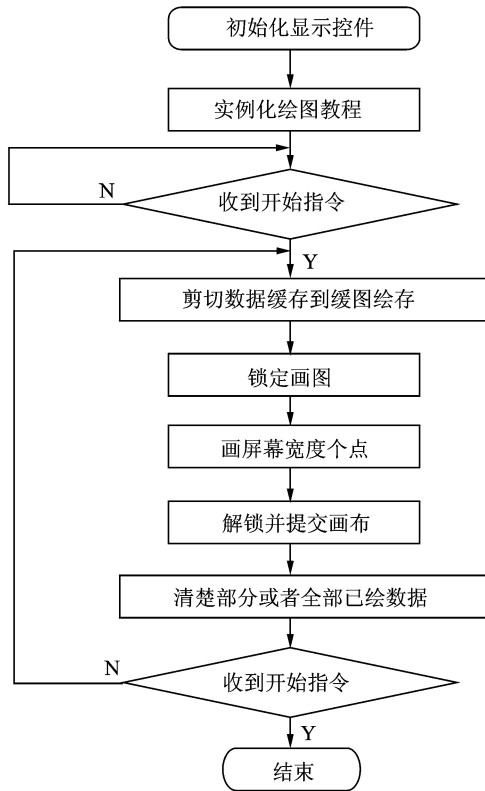


图 5 显示模块流程图

Fig. 5 Process graph of display module

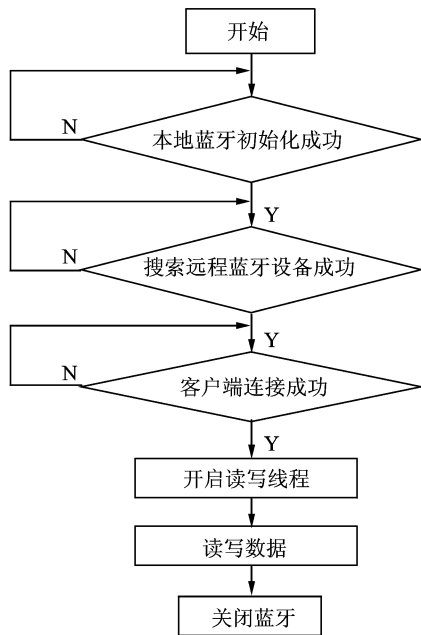


图 6 蓝牙通信流程图

Fig. 6 Process graph of Bluetooth communication

中采集器为 Arduino MEGA 2560, A/D 转换精度为 10 位,最高采样频率为 15 kHz;蓝牙通信模块为 HK-750,蓝牙 2.0 通信协议,传输距离约为 10 m,其传输率为 1 Mbps<sup>[16]</sup>。当以最高采样频率采集数据时,数据量为 0.15 Mbps,符合蓝牙通信要求。

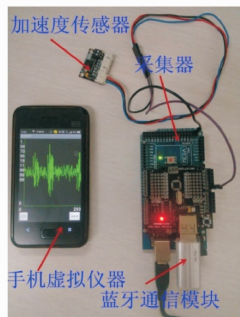


图 7 完整仪器系统图

Fig. 7 Full instrumentation system diagram

### 3 试验验证与分析

现用所开发的仪器在一轴承故障试验台上进行了现场测试,并与 LabVIEW 系统分析结果进行了对比。试验现场如图 8 所示,其中振动传感器为 MMA7260 低功耗三轴加速度传感器;手机为 M9, CPU 频率为 1 GHz,其内存容量为 512 MHz,主频分辨率  $960 \times 640$ 。试验轴承型号为 6205-2RS JEM SKF 深沟球轴承,内径为 25 mm,外径为 53 mm,轴承节径为 39 mm,滚动体 9 个,滚动体直径 8 mm,接触角  $\alpha = 0^\circ$ 。试验台工作转速为 1 750 r/min,采样频率为 12 kHz。根据式(1~3),轴承主要故障特征频率如表 1 所示。

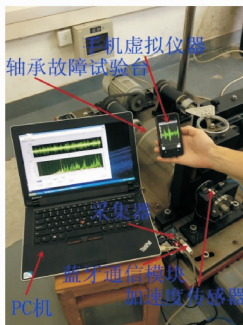


图 8 轴承测试实验现场图

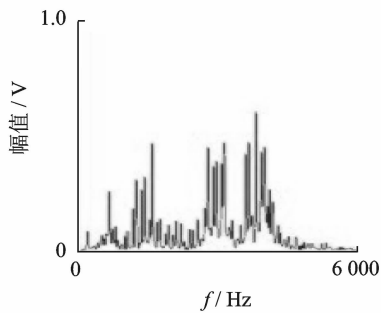
Fig. 8 Bearing test site map

表 1 轴承故障特征频率

Tab. 1 Bearing fault characteristic frequency Hz

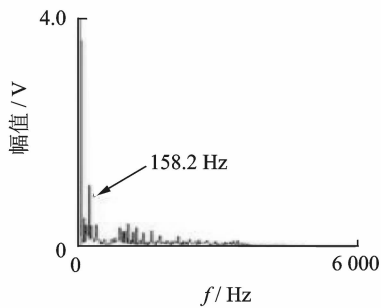
类型	特征频率
内圈故障	157.943
外圈故障	104.557
滚动体故障	137.477

图 9~10 为分别利用本仪器和 LabVIEW 对图 9 所示的时域信号进行频谱分析的结果。可以看出,两类系统的分析结果完全一致。同时,由图 9



(a) 幅值谱

(a) Amplitude spectrum

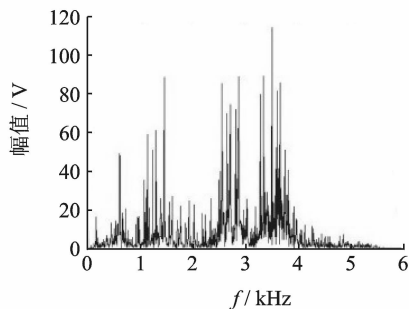


(b) 解调谱

(b) Demodulation spectrum

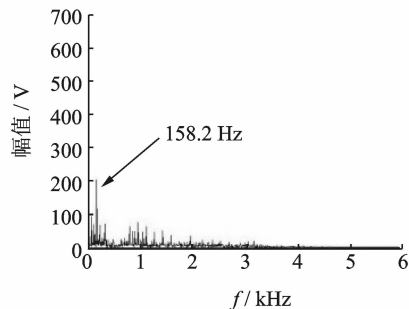
图 9 本仪器分析结果

Fig. 9 Analysis results of the instrument



(a) 幅值谱

(a) Amplitude spectrum



(b) 解调谱

(b) Demodulation spectrum

图 10 LabVIEW 分析结果

Fig. 10 Analysis results of LabVIEW

(a)可见,信号频率成分非常复杂,难以准确评定故障。根据轴承故障信号特点,对图该振动信号进行希尔伯特包络谱分析,结果如图9(b),10(b)所示。从图11(b)中可以看出,在158.2 Hz位置出现了明显的峰值。结合表1,该频率与轴承内圈的故障特征频率吻合,所以可以判断轴承内圈出现故障,结果与实际情况一致。

## 4 结束语

随着手机运算等性能的提高,基于手机移动终端的检测仪器系统的开发与应用已得到越来越广泛的研究,是检测仪器发展的新趋势。笔者分析了Android系统中虚拟仪器的跨平台开发的基本原理,建立了基于数据无线传输的手机虚拟仪器系统框架,探讨了虚拟仪器开发过程中的关键问题,最终开发了在线手机虚拟仪器,并在轴承故障实验台上进行了对比分析实验。与传统虚拟仪器比较,手机虚拟仪器携带使用方便,操作便捷,该仪器分析结果准确,具有实际应用价值。

然而,手机运算能力与一般计算机性能仍有差距,因此如何进一步优化测试分析功能,提高分析处理速度是手机仪器的关键。同时,目前绝大部分传感器及其调理设备仍然主要面向Windows系统,因此Android系统下信号调理与采集系统的研究与开发是大力发展手机仪器的另一个关键问题。

## 参 考 文 献

- [1] 张健. 机械故障诊断技术 [M]. 北京:机械工业出版社,2008:214.
- [2] 朱革. 齿轮噪声解调分析新方法及其音质主观评价体系的研究[D]. 重庆:重庆大学,2003.
- [3] Chen Binqiang, Zhang Zhousuo, Sun Chuang, et al. Fault feature extraction of gearbox by using overcomplete rational dilation discrete wavelet transform on signals measured from vibration sensors[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012, 33 (2012): 275-298.
- [4] Gong Aiping, Yu Junlin, He Yong, et al. Citrus yield estimation based on images processed by an Android mobile phone[J]. Biosystems Engineering, 2013, 115 (2):162-170.
- [5] Zhang P, Li B, Huang Z, et al. Research of Temperature measuring virtual instrument based on smart mobile phone [C]//International Workshop on IEEE, Intelligent Systems and Applications (ISA). Washington, DC 20036-4910, USA; IEEE, 2009:1-4.
- [6] 尹爱军, 杨正益, 孙丽萍, 等. 虚拟仪器开发中功能组态设计[J]. 振动、测试与诊断, 2010, 30(2):193-196.
- [7] Yin Aijun, Yang Zhengyi, Sun Liping, et al. Design of function configuration in virtual instrument development [J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2010, 30(2): 193-196. (in Chinese)
- [8] 梁锋. 通用性齿轮箱状态检测与故障诊断系统的研究 [D]. 重庆:重庆大学,2004.
- [9] Flores A Q, Cardoso A J M, Carvalho J B. Gearbox fault detection by wavelet and spectrum analysis of the induction motor power [C]//2013 IEEE International Electric Machines & Drives Conference (IEMDC). Washington, DC20036-4910, USA; IEEE, 2013: 88-92.
- [10] Developers A. What is Android [EB/OL]. (2011-09-22) [2013-07-21]. <http://developer.android.com/guide/basics/what-is-Android.html>.
- [11] Son K C, Lee J Y. The method of android application speed up by using NDK [C]//2013 3rd International Conference on Awareness Science and Technology (ICAST). Washington, DC20036-4910, USA; IEEE, 2011: 382-385.
- [12] 肖洁. 基于Walsh变换的滚动轴承典型故障诊断方法研究[D]. 大庆:大庆石油学院,2010.
- [13] Mohanty A R, Kar C. Multiresolution Fourier transform of ripple voltage and current signals for fault detection in a gearbox [C]// IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). USA; IEEE, 2006: 1367-1373.
- [14] Oppenheim A V, Schaffer R W, Buck J R. Discrete-time signal processing [M]. Englewood Cliffs; Prentice-hall, 1989: 9-70.
- [15] 沈国际. 振动信号处理技术在直升机齿轮箱故障诊断中的应用[D]. 长沙:国防科技大学,2005.
- [16] 魏晓艳, 李军. 红外通讯技术与蓝牙技术比较[J]. 电子元器件应用, 2007, 4: 68-69, 72.
- Wei Xiaoyan, Li Jun. Comparison between infrared communication technology and Bluetooth Technology [J]. Electronic Component & Device Applications, 2007, 4: 68-69, 72. (in Chinese)
- [17] Rashid R, Yusoff R. Bluetooth performance analysis in personal area network (PAN) [C]// RF and Microwave Conference. Washington D. C., USA; IEEE, 2006: 393-397.



**第一作者简介:**尹爱军,男,1978年5月生,博士、教授。主要研究方向为智能测试与虚拟仪器,现代信号分析处理,无损检测,故障检测与诊断等。曾发表《Physical interpretation and separation of eddy current pulsed thermography》(《Journal of Applied Physics》2013, Vol. 113, No. 6)等论文。

E-mail: aijun.yin@cqu.edu.cn



