

汽轮发电机组远程振动监测新技术研究与应用

刘晓锋, 卢修连, 何利鹏, 何小锋

(江苏方天电力技术有限公司, 江苏 南京 211102)

摘 要: 随着汽轮发电机组单机容量和运行参数的提高, 振动安全日益重要, 同时设备管理信息化水平的提升, 旋转机械振动远程监测诊断系统在近年得到了广泛的应用。目前远程监测诊断系统在使用过程中, 系统的稳定性、数据的准确性, 振动分析功能的完备性均存在缺陷, 远没有实现其功效。本文从技术层面提出了基于 PXI 总线和计算阶比跟踪技术的远程振动监测系统, 在动态信号数据采集和分析方面基于先进的测控仪表 PXI 总线和计算阶比振动信号分析技术, 在远程监测诊断软件技术方面, 采用跨平台的 Java EE 编程技术实现, 对现有远程监测系统进行了全面的技术提升, 代表了未来的技术发展方向。

关键词: 振动; 远程监测; PXI 总线; 阶比分析; JAVA EE

0 引言

汽轮发电机组单机容量已突破 1000MW, 运行参数达到超超临界, 势必要求电厂安全运行管理水平的科学化、严格化, 因此汽轮发电机组振动日益成为机组安全运行的重要考核指标。与此同时, 尽管当前汽轮发电机组的设计制造以及安装水平有了大幅提高, 但由于新机型大量投运以及机组改造的增多, 振动问题一直以来是威胁机组安全运行的主要因素。由于振动故障分析处理的专业性极强, 振动分析处理一般都是依靠科研院所专业人员。而分析人员往往是在振动发生后进行事后分析, 缺乏有效的振动历史数据和典型的振动特征数据。因此近 10 年内机组振动在线监测系统 (TDM) 较广泛的在电厂装配, 而且部分系统进行了延伸, 将振动数据远程传输实现远程振动监测诊断 (RMD)。2000 年以来, 技术成熟、投入商业使用的系统主要有五种: System one 系统 (美国通用本特利)、RMD8000 系统 (阿尔斯通创为实)、TN8000 系统 (华科同安)、EN8000 (英华达)、MMS6851 (松源艾普)。但实际使用效果远未达到预期, 主要原因:

(1) 不同品牌振动在线监测系统使用专有数据接口和传输协议, 商业保密, 不兼容、不通用。不利于推广应用。

(2) System one 系统的子系统即电厂内部 TDM 系统数据采集硬件采用 VME 总线, 振动信号处理也采用了计算阶比跟踪技术, 应该是目前国际

领先水平。但其远程系统 (RMD) 软件采用 Crtix 通过网络远程登录 TDM 系统, 效率低、安全性差, 特别是传输类似于动态振动信号这种海量数据, 无法实现振动分析诊断的实时性和快速响应。

(3) RMD8000 和 TN8000 系统的子系统 TDM 系统均采用 PCI 总线, 是一种工控机总线、尽管支持的硬件较为灵活, 但稳定性差, 而且不支持热拔插, 对于在线监测需要长期连续运行的仪器仪表显然不适合。而且在振动信号处理方面采用硬件技术实现振动信号整周期同步采样, 可靠性差, 成本高, 在转速快变时经常出现硬件无法跟踪到转速的情况。但是 RMD8000 的远程系统采用先进的网络化编程工具 JAVA, 采用 B/S 模式, 还是具有一定的先进性。TN8000 的远程系统采用 VC++ 开发, 无法跨平台使用, 而且程序笨重, 属于 C/S 模式, 需要安装客户端软件, 维护升级复杂, 属于较低档次的网络应用。

本文从 PXI 仪器仪表总线的数据采集系统、计算阶比分析振动信号处理方法以及 JAVA EE 编程技术三方面来阐述振动远程监测系统的体系架构和关键技术。

1 系统总体设计

典型的远程振动监测与故障诊断系统整体结构主要由三个部分组成: 1) 数据采集站; 2) 中心服务器 (专职工程师室); 3) 机组远程监测诊断中心 (RMD 系统), 如图 1 所示。数据采集站和中心

服务器组成汽轮机振动监测诊断系统(TDM 系统), 机组远程监测诊断中心即 RMD 系统。TDM 系统+RMD 系统即为所指远程振动监测与故障诊断系统。

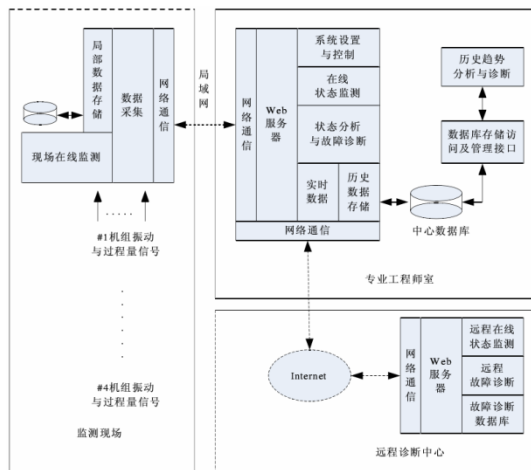


图1 远程振动监测与故障诊断系统数据流程图

(1) 数据采集站

机组振动数据采集系统完成现场各种信号（振动信号、转速信号、热工过程量信号等）的数据采集，信号调理、特征运算与显示等功能。采集系统的另外两项功能是实时数据存储和网络数据传输。一般的，电厂内部的 Web 服务器和 Web 数据库都放在远离生产现场的地方，采用光纤以太网连接数据采集系统与服务器，用局域网通信技术实现相互之间的通信。

(2) 中心服务器

中心服务器是远程监测诊断系统的数据服务和交换中心，设有 Web 服务器和 Web 数据库，完成数据存储、数据管理、Web 数据发布、在线监测与初步故障分析、系统设置与控制等功能。Web 服务器通过局域网，由网络通信模块与现场数采系统的工业计算机通信，对采集过程进行控制，将机组运行数据保存在实时数据库中，并提供给电厂内部及远程监测诊断中心实时显示，同时将部分运行数据作为历史记录存储在中心数据库中，以备将来对机组运行历史信息的查询以及历史趋势分析等。专职工程师可以通过系统提供的各种分析、诊断工具，如快速傅立叶变换、小波变换等，加上大量的振动分析特征图表，实现基本的故障诊断功能。数据采集站与中心服务器共同组成了 TDM 系统。

(3) 远程监测与故障诊断中心(RMD)

远程诊断中心设在科研院所或集团公司，通过互联网络对电厂机组的运行情况实施远程监测和状

态分析，对现场提交的故障诊断请求做出响应。

本文系统总体架构:TDM 系统现场数据采集站采用 PXI 总线，振动信号分析处理采用软件计算阶比分析技术，远程 RMD 系统采用 B/S 模式，应用 JAVAEE+MVC+MySQL 开发。下面详细论述实现本发明的关键技术和方法。

2 基于 PXI 总线的振动信号采集系统

在现代计算机测试系统中，总线技术越来越受到重视。因此，在测试系统研制中，选择好的测试系统平台总线，不仅有助于系统最终以较低成本满足更高的性能要求，而且可以使系统更加容易扩充、升级和保护用户的投资效益。

测控总线是指以组成测量和控制系统为主要目标而开发的总线。自数字计算机问世以来，各种总线标准不断推出，如 PC、ISA、PCI 总线。虽然在 PC、ISA、PCI 总线系统上加入各种 I/O 功能模块板，也可以组成测控系统，但这不是这些总线标准设计的主要目。为测控系统设计的总线主要有 CPCI、GPIB、VME、VXI 和 PXI 等总线。

在 GPIB、PC-DAQ 和 VXI 三种 VI 体系结构中，GPIB 实质上是通过计算机对传统仪器功能的扩展与延伸，传输速率一般低于 500kB/s，适合对计算机数据传输速率要求不高的测量；PC-DAQ(PCI 总线)直接利用了标准的工业计算机总线，没有仪器所需要的总线性能；而第一次构建 VXI 系统尚需较大的投资强度。

PXI 是 PCI 在仪器领域的扩展(PCI eXtensions for Instrumentation)，它将 CompactPCI (CPCI) 规范定义的 PCI 总线技术发展成适合于试验、测量与数据采集场合应用的机械、电气和软件规范，从而形成了新的虚拟仪器体系结构。PXI 总线技术不仅保留了 PCI 总线较高的数据吞吐能力，而且采用了坚固的欧洲插卡组装技术。为了适应测试仪器的需要，还扩展了与 VXI 总线类似的仪器总线，如触发总线、本地总线、系统参考时钟以及只有 D 尺寸 VXI 总线才有的星型触发总线。

2.1 功能概述

研制的数据采集卡是一种基于 PXI 标准的同步采集功能卡，可直接插在 PXI 机箱插槽中，用于旋转机械动态振动信号采集。板卡尺寸为 3U 高度 100mm*160mm，主要元器件布局及简要说明如

图 2, 输入端子采用 BNC 连接器, 模拟信号调理电路可以实现涡流探头和速度传感器切换。

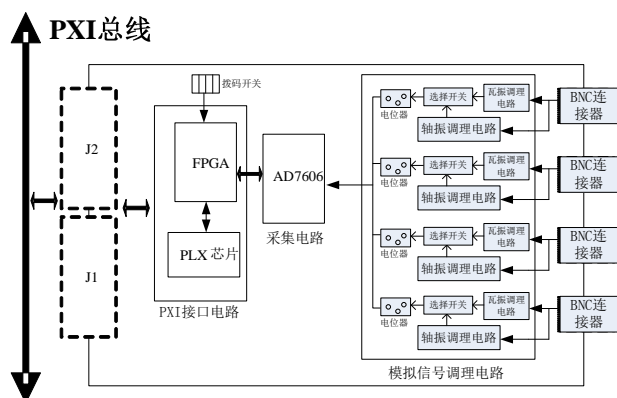


图 2 PXI 总线采集卡元件布置图

2.2 工作原理

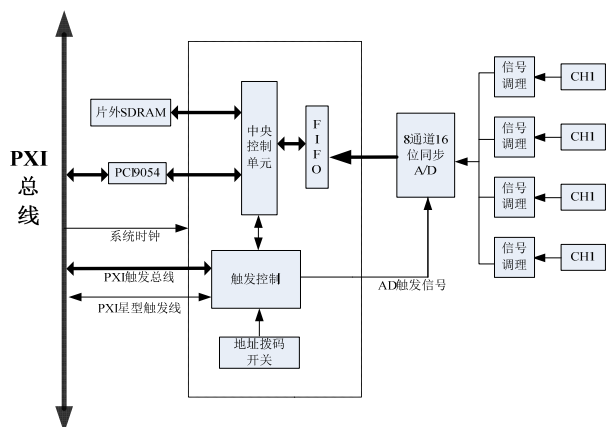


图 3 PXI 总线采集卡工作原理图

工作原理如图 3 为数据采集卡原理结构图。该设计的每个数据采集卡包含 4 个独立的信号采集通道, 每通道均具有一个独立的 16 位 A/D 转换器和低噪声信号调理电路, 整个采集卡具有 512 MB 的 SDRAM 数据存储。各通道独立并行采样, 每通道均可实现 64kHz 的最高采样率。从外部传感器送来的模拟信号经过信号调理、程控滤波后送入 16 位 A/D 转换器中进行模数转换, 转换后的数据送入 FPGA 内部的数据缓冲器, 再写入到 SDRAM 中。当 SDRAM 中存储的采样数据达到软件所设定的存储长度时, FPGA 中央控制单元就通过 PXI5210 或 PXI5220 向 PXI 总线发送读取采样数据中断, PXI 总线在接收到中断信号以后, 就通过 PXI 总线来读取 SDRAM 中的采样数据。校准控制单元校准模拟通道的增益和偏置, 用来补偿 A/D 转换结果的

精度, 把模拟通道的失真减为最小。触发控制单元用来判断外部数字触发、通道触发、总线触发以及星型触发等触发信号, 保证触发通道之间的同步采集。补充: 虚线框图中为 FPGA, 图 3 中没有校准控制室因为我们的校准做在信号调理部分里面了, 所以也没有校准信息存储这部分了。

3 振动信号计算阶比分析技术

3.1 阶比分析的方法

传统的旋转机械振动阶比跟踪方法采用硬件方式来实现, 需要有锁相环、倍频分频电路, 并且还需要有截止频率实时可调的抗混叠跟踪滤波器等, 电路复杂, 成本高。而且传统的阶比跟踪方法用在变速机械, 特别是升、降速率较高时, 由于瞬时频率无法跟踪只能采用预设, 又由于等角度重采样是通过硬件的再次采样, 因此, 阶比跟踪会出现大的误差, 甚至是错误的分析结果。

为解决现有技术的问题, 提出一种由固定的采样频率实现旋转机械振动信号同步阶比跟踪分析方法, 通过由固定的采样频率实现精确的等角度采样, 不存在频率混乱现象, 也就是转轴每转动一次, 采样点对应于转轴上的角度差是一致的, 在转轴上位置是固定的, 从而实现准确的整周期同步采样。

3.2 阶比分析的具体实施方式

一种由固定的采样频率实现旋转机械振动信号同步阶比跟踪分析方法实施例, 见图 4 至图 11, 所述方法包括采用固定采样频率同步采集旋转机械振动信号和旋转一周出现一次的键相脉冲信号, 选取一个振动阶比数 M , 利用插值滤波器对键相脉冲进行 $2 \times M$ 倍插值, 得到等角度信号样本的时间序列, 然后对振动信号进行低通滤波和插值重采样, 得到等角度振动采样信号, 经过对等角度振动采样信号进行处理, 最终得到振动阶比谱与各阶谐波波形; 其具体步骤是:

1) 由大于最大转速频率 \times 阶比数 M 的固定采样频率连续同步采集旋转机械振动信号和转速键相脉冲信号;

2) 根据一个阈值识别键相脉冲信号上升沿和下降沿的到达时间, 通过到达时间计算每两个脉冲间的时间差, 从而确定旋转机械每转动一周的转速和一周瞬时频率;

3) 采用基于 FPGA 的级联积分梳状滤波器

（CIC，Cascaded Integrator Comb filter）作为插值滤波器，改为对键相脉冲进行 $2 \times M$ 倍插值，得到与振动均角信号对应的时间序列；

4) 由旋转机械瞬时频率和所述时间序列，对振动信号进行抗混叠数字滤波，由插值（重采样算法）得到对应时间序列的振动等角度采样信号。

5) 对等角度采样信号进行快速傅里叶变换（FFT）得到连续的旋转机械振动阶比谱，对等角度采样信号进行恒带宽滤波或者 Gabor 变换，得到连续的各阶谐波波形。

本实施例实时跟踪的实现：每采集 0.25s 就进行一次信号分析，信号重采样频率是根据实际转动频率（因为信号已经完成采集，根据信号进行精确计算的）进行调整的，而非硬件方式下，由上一次转动频率值，对下一次转动频率进行预测，再对采样频率进行调整。

实施例中，所述的插值重采样算法是线性插值、样条插值、拉格朗日插值或者 sinc 插值算法中的一种。在精度运行范围内，最佳方案是采用线性插值，速度快，准确精度高。

实施例中，所述阶比数 M 是 2 的 n 次方， n 是 4 或 4 以上的正整数。最佳 n 是 6，速度快，精度已基本满足要求。

实施例中，所述数字滤波采用 Kaiser 窗 FIR 滤波器。

本实施例中：

1) 如图 4 所示，按照某一固定的采样频率；如图 3 所示，同步采集旋转机械的一路转速键相脉冲信号；和如图 5 所示， N 路振动信号；

2) 对键相脉冲信号，根据上升（或下降）沿电压值大小人为指定阈值（threshold），或按照某一算法，由统计学规律，自动计算阈值大小。根据这一阈值，由检波算法，如图 8 所示，准确识别和记录键相脉冲信号上升沿（或下降沿）的到达时间 t_0 、 t_1 、 $t_2 \dots t_N$ ；

3) 如图 9 所示，由两个脉冲间的时间差， $dt_0=t_1-t_0$ ， $dt_1=t_2-t_1$ ， \dots ， $dt_{N-1}=t_N-t_{N-1}$ ，计算转速 rpm 和瞬时频率 f ；

4) 根据分析需要设定阶比数 M （可以取 16、32、64、128、256 等），采用 CIC 插值滤波器，对键相脉冲进行 N 倍插值（ $N=2M$ ），得到角域等角度振动信号每一样本对应的时间序列；

5) 由转子瞬时频率和重采样时间序列，对振动信号进行数字滤波，由插值重采样算法，如图 10 所示，得到等角度采样信号，其中，插值重采样算法可以采用线性插值、样条插值、拉格朗日插值或者 sinc 插值算法；

6) 对等角度采样信号进行快速傅里叶变换（FFT），得到图 11 所示的旋转机械振动阶比谱，对等角度采样信号进行恒带宽滤波或者 Gabor 变换，可以得到各阶谐波波形。

本实施例方法目的是实现精确的等角度采样，也就是转轴每转动一次，采样点对应于转轴上的角度差是一致的，在转轴上位置是固定的，从而实现准确的整周期同步采样。

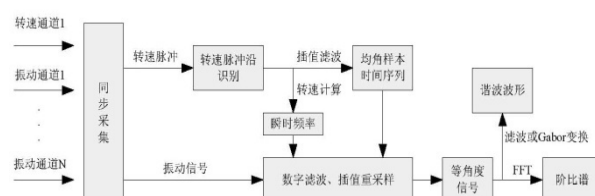


图 4 阶比计算实现流程图

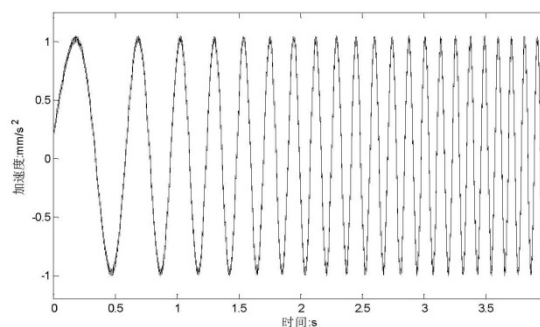


图 5 基频为线性变化的模拟振动信号示意图

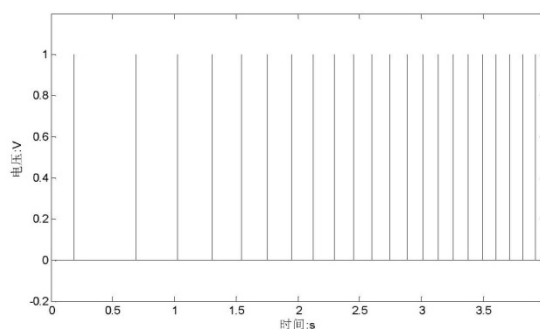


图 6 是模拟的键相脉冲信号示意图

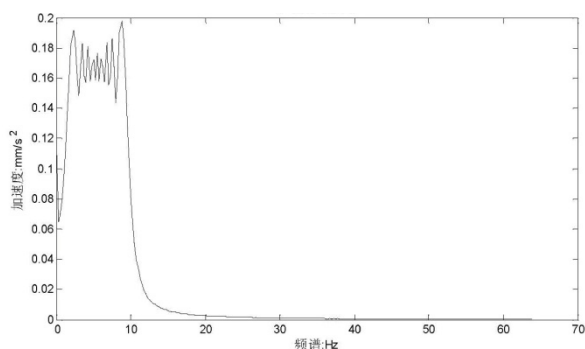


图 7 是模拟振动信号的频谱示意图

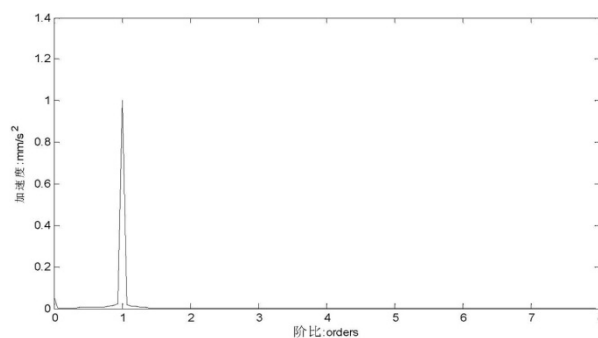


图 11 计算得到的阶比谱示意图

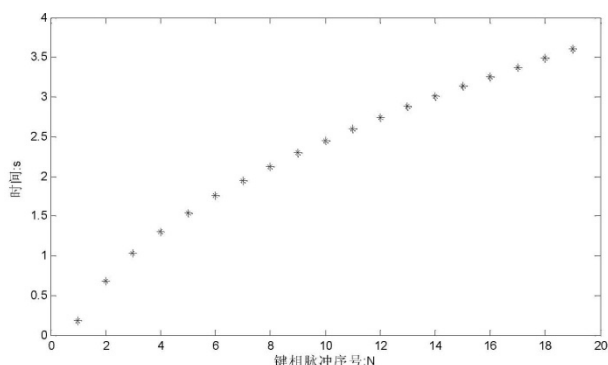


图 8 计算得到的键相脉冲时间示意图

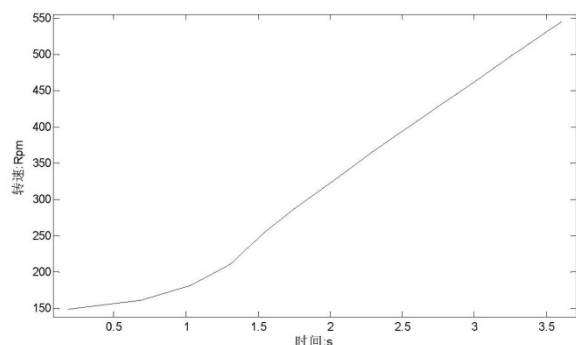


图 9 计算得到的转速曲线示意图

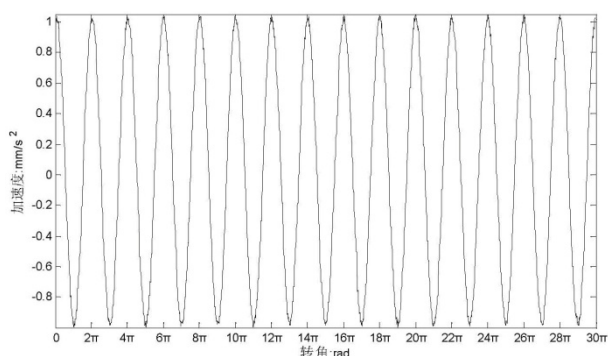


图 10 计算得到的振动均角信号示意图

4 JavaEE 实现远程振动监测诊断

在远程系统 (RMD) 的设计开发中, 主要采用了 B/S 工作模式、JavaEE MVC 设计模式、MySQL 数据库。

4.1 系统整体设计

RMD 系统实现的主要功能有:

a) 实时监测机组运行状态, 以多种图谱的形式展现给用户, 实现的图谱有: 多趋势图、Bode 图、波形图、频谱图、瀑布图、层叠图、极坐标图、轴中心位置图、键相图、特征量列表、单值棒图。

b) 统计并分析历史数据, 为机组维护和故障诊断提供依据。

c) 数据上报功能。可以将数据上报到集团公司, 也可以构建专门的远程数据中心, 远程中心的专家可以在异地远距离实时监测、评估和故障诊断, 参与决策处理。

(1) 组织结构

本系统的组织结构如图 12 所示, 分为工厂管理区域、集团公司 (可选) 和远程数据中心 (可选)。图中的工厂生产区域处在本系统的外围, 主要负责现场数据采集, 是本系统的原始数据来源, 其产生的数据保存在 MySQL 数据库中。

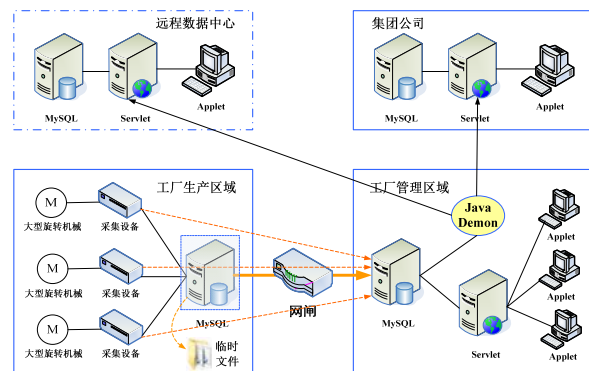


图 12 系统组织结构

工厂管理区域、集团公司、远程数据中心的结构都可以由图 13 来描述，采用了 JavaEE MVC 设计模式。

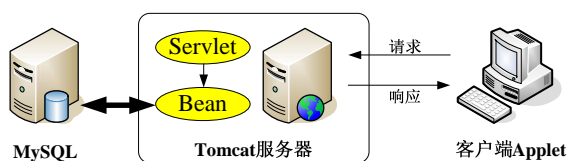


图 13 基于 JavaEE MVC 设计模式

(2) 消息协议

RMD 系统采用面向对象的设计思想，对象（模块）之间的通信通过消息来实现，因此，设计一个良好的消息协议尤为重要。本系统的消息传递如图 14 所示，分为图谱与导航树之间，图谱、导航树与服务器之间两大类。

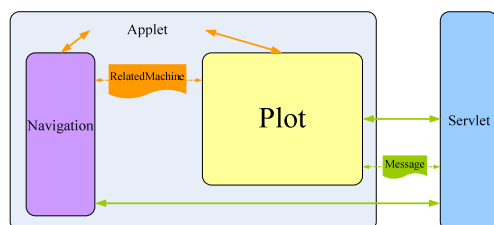


图 14 系统的消息传递

a) 图谱与导航树之间。交互的信息包括通道选择、数据时期类型、时间区间等，其消息格式为 RelatedMachine。用户可以通过导航树，改变图谱的通道、选择实时分析、历史分析（指定时间区间）等。RelatedMachine 类的主要数据成员如下：

```
public class RelatedMachine {
    private int machineID;    // 机组号
    private byte plotType;    // 图谱类型
    private long channelMap;  // 通道图（包含多通道信息，二进制位运算）
}
```

b) 图谱、导航树与服务器之间。交互的信息包括消息类型、机组信息、通道信息、监测数据等，其消息格式为 Message。图谱或导航树把消息发送给服务器（Servlet），服务器调用相应的工具 Bean 查询数据并返回。Message 类的主要数据成员如下：

```
public class Message implements Serializable {
    private byte messageType; // 消息类型
    private short errorID;   // 错误编号
    private int machineID;   // 机组 ID
    private long channelMap; // 通道图（包含多
```

通道信息，二进制位运算）

```
private byte[] data;    // 消息数据
}
```

c) 消息线程。Message 消息的收发，是由专门的消息线程来完成的，导航树、各个图谱都有相应的消息线程，由 MessageThread 类来实现，其主要数据成员和方法如下：

```
public class MessageThread extends Thread {
    private String urlString;    // Servlet 地址
    private Object sendMessage;  // 发送消息
    private Object receiveMessage; // 接收消息
    private Workable job; // 使用该线程的实体对象，当线程获取数据时，调用该实体对象的 process()方法

    public void send(URLConnection connection, Object sendMessage); // 发送消息
    public Object receive(URLConnection urlConnection); // 接收消息
}
```

(3) Demon 上报数据小程序

Demon 负责将数据上报到集团公司或远程数据中心。当工厂隶属于某一集团时，可以将数据上报给集团。出于安全考虑，工厂并不能直接将数据保存到集团的数据库中，而是通过 Demon 小程序与集团的 Servlet（Tomcat 服务器）通信，实现数据的上报。上报数据到远程中心的方法与此完全相同。

(4) 数据库设计与优化

为保存监测数据，需要使用数据库，本系统采用 MySQL 数据库。

A 数据库设计

根据系统结构和功能的划分，数据库结构可以划分为：

a) 全局配置数据库：

负责管理集团、工厂、用户等信息。

b) 工厂配置数据库

负责管理工厂下面的监测分站、机组等信息。

c) 监测数据数据库

保存实时、历史、启停机等监测数据。

本系统采用 Java Bean 充当模型（Model）的角色，其操作数据库的模式可以概括为图 15。创建与

数据库表对应的值 Bean，再创建相应的工具 Bean，通过 SQL 语句操作数据库，将结果保存在相应的值 Bean 中，返回给用户。



图 15 Java Bean 封装、操作数据库

B 数据库优化

数据库连接是一种关键的有限的昂贵的资源，对数据库连接的管理能显著影响到整个应用程序的伸缩性和健壮性，影响到程序的性能指标，数据库连接池正是针对这个问题提出来的。数据库连接池负责分配、管理和释放数据库连接，它允许应用程序重复使用一个现有的数据库连接，而不是再重新创建一个，实践表明，这项技术能明显提高对数据库操作的性能。

本系统在设计中，即采用了 MySQL 连接池技术，在 Tomcat 服务器的 context.xml 文件中配置了连接池：

```

<Resource name="jdbc/db_config"
auth="Container" type="javax.sql.DataSource"
maxActive="100" maxIdle="30"
maxWait="10000" username="root" password="111"
driverClassName="com.mysql.jdbc.Driver"
url="jdbc:mysql://localhost:3306/db_config" />
  
```

4.2 系统测试

本系统的配置步骤如下：

1) 安装 JRE。

2) 安装 Tomcat，将服务器代码发布到 Tomcat\webapps 目录下。

3) 安装 MySQL，运行数据库脚本，初始化数据库表结构并插入若干条记录。

4) 启动数据采集。

5) 在客户端浏览器中输入网址：
http://ServerIP:Port/Test/index.jsp 登录并访问本系统，其中，服务器项目名为 Test，ServerIP 和 Port 取实际配置的服务器 IP 地址和端口。

下面给出实时监测、历史分析和数据上报的测试结果。

(1) 实时监测

图 16 给出了实时监测机组的情形，同时选择了多趋势图、单值棒图、波形图和轴心轨迹图，绘制出了机组的实时运行曲线。

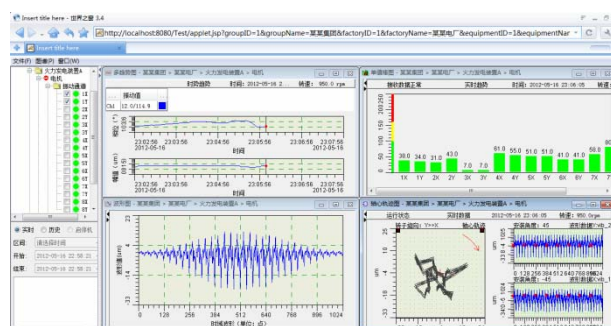


图 16 实时监测综合图谱

(2) 历史分析

图 17 给出了历史分析的情形，以多趋势图为例，选择了四个振动通道，绘制出了机组前一个小时的运行曲线。

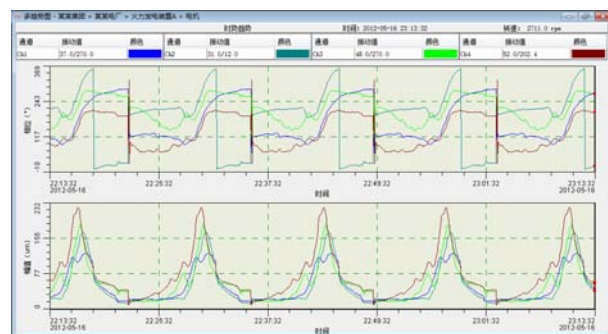


图 17 历史分析

(3) 上报数据

当获取了集团公司或远程数据中心 Tomcat 服务器 IP 地址后，即可以上报数据到集团公司或远程数据中心。集团公司和远程数据中心的服务器配置过程与工厂完全类似，客户端访问形式也一样。Demon 上报时的运行状态如图 18 所示。

Time	Type	Event
2012-05-16 22:09:44	INFO	Find a new SS-START data! MachineID is 1.
2012-05-16 22:11:36	INFO	Flush 5m history data, OK!
2012-05-16 22:16:37	INFO	Flush 5m history data, OK!
2012-05-16 22:21:38	INFO	Flush 5m history data, OK!
2012-05-16 22:22:14	INFO	Finished saving SS-START data! MachineID is 1.
2012-05-16 22:23:16	INFO	Find a new SS-START data! MachineID is 1.
2012-05-16 22:26:40	INFO	Flush 5m history data, OK!
2012-05-16 22:31:38	INFO	Flush 30m history data, OK!
2012-05-16 22:31:41	INFO	Flush 5m history data, OK!
2012-05-16 22:35:43	INFO	Finished saving SS-START data! MachineID is 1.
2012-05-16 22:36:42	INFO	Flush 5m history data, OK!
2012-05-16 22:36:47	INFO	Find a new SS-START data! MachineID is 1.
2012-05-16 22:41:43	INFO	Flush 5m history data, OK!
2012-05-16 22:46:44	INFO	Flush 5m history data, OK!

图 18 上报数据

5 结束语

汽轮发电机组远程监测诊断技术经过十余年的发展，目前进入了低谷。究其原因，一是：技术陈旧落后，导致采集的振动数据无法达到故障诊断

的要求；二是，故障振动系统的人工智能化停滞不前。本文在动态信号数据采集和分析方面基于先进的测控仪表 PXI 总线和计算阶比振动信号分析技术，在远程诊断软件方面，采用合跨平台的 Java EE 编程技术，对现有的远程振动监测系统进行了全面的技术提升，取得了良好的效果。下一步将在远程系统的智能诊断和系统的易用性方面进行研究和突破。

鸣谢

特别鸣谢安徽电科院汪江博士提供技术支持。

作者简介：

刘晓锋（1976-），男，工学博士，高级工程师，从事旋转机械振动监测及故障诊断工作。