

高精度地震采集系统中的主控软件设计

周 杰, 宋克柱, 曹 平, 程伊敏

(中国科学技术大学快电子学实验室, 合肥 230026)

摘 要: 为了保证海上高精度地震勘探数据采集系统中各节点能协调同步工作, 设计主控软件。采用增量迭代的开发方法, 通过统一建模语言进行系统分析, 利用服务总线、并行处理技术实现对系统的统一管理和实时质量监控。实验结果表明, 该主控软件在系统最大负荷 4×1920 道时, 各方面性能均满足要求, 且运行稳定、扩展性强。

关键词: 并行处理; 多线程; 统一建模语言; 服务总线

Design of Main Control Software in High Precision Earthquake Acquisition System

ZHOU Jie, SONG Ke-zhu, CAO Ping, CHENG Yi-min

(Fast Electronics Laboratory, University of Science and Technology of China, Hefei 230026)

【Abstract】 In order to ensure interactional synchrony working of all nodes in high precision prospect seismic data acquisition system at sea, this paper designs the main control software. This design uses the method of incremental-iterative for development, analyzes system by Unified Modeling Language(UML). It uses service bus, parallel processing technique to realize unified management and real time monitoring for system. Experimental result shows that this main control software can fit the system request well when it is peak load at 4×1920 channel, and it provides with good stability and expansibility.

【Key words】 parallel processing; multithreading; Unified Modeling Language(UML); service bus

1 概述

国内近海海域油气资源相当丰富, 但由于海上勘探发展落后, 勘探设备和技术全部被国外垄断, 海上石油的开发还处于起步阶段。“十一五”国家“863”高科技研究计划针对南海深水油气勘探立项研究具有自主知识产权的高精度海上油气勘探设备, 打破了国内海上勘探设备完全依赖进口的被动局面, 填补了国内空白, 对领海油藏开发有着重要的战略意义。同时, 对于维护国内领海, 特别是远海的主权完整, 具有重大政治意义。

高精度地震拖缆系统主控软件是整个高精度油气勘探装备的控制与管理平台, 本文介绍了其设计过程及实现的关键技术。

2 高精度地震采集系统

海上石油勘探已由浅海逐渐向深海延伸, 这要求勘探装备具有多缆多通道、高采样率、高分辨率、大动态范围、高信噪比、实时处理等特点, 多缆多通道三维勘探增加了空间域信息、高分辨率勘探增加了信号的采样精度、高采样率增加了信号频域的信息, 这些综合构成了高精度海上油气勘探装备的设计要素^[1]。

本文高精度地震拖缆采集系统的设计为分布式架构, 由采集、传输、主控和记录 4 个节点组成。采集节点接收海底反射的由震源激发的地震信号, 并将其转化成数字信号, 通过数据传输节点(工业级 Compact PCI 机箱)传送到主控工作站和记录工作站, 并将数据进行处理、显示和存储, 从而为工作人员进行质量监控和分析提供准确的数据。本系统实现了 4 条拖缆, 单缆最大 3 840 道, 最高 0.25 ms 采样间隔的高

精度地震数据采集, 其单缆振子数据率达到 11.52 MB/s。

主控工作站是该采集系统的重要节点。其上运行的主控软件是整个系统的控制中心, 负责系统各节点的动态管理和事务调度, 以及对采集数据的实时交换、处理和显示。在分布式架构下, 主控软件如何完成事务的灵活控制和管理是保证系统各节点协调同步工作的关键。另外, 采集系统在高精度、高采样率的要求下, 主控软件能否将采集到的庞大数据进行实时处理并提供可视化图形监控, 也将直接影响到整个勘探系统的性能。

3 总体分析和设计

统一建模语言(Unified Modeling Language, UML)是一种通用的, 对软件密集系统进行描述、构造、可视化和文档编制的, 高度图形化的建模语言^[2]。使用 UML 在程序开发过程中对系统进行各种角度的抽象建模, 可以大大降低设计难度。本软件基于该标准语言, 分别从系统外部(用例图)和内部(逻辑图)进行建模, 使软件结构清晰、易于维护, 缩短了系统设计的时间。

3.1 系统功能分析

用例视图描述了外部用户所能观察到的系统应具备的功能, 很好地描述了用户和软件系统之间的协作关系。建立用例图是设计软件需求分析阶段的首要任务。图 1 为主控软件

基金项目: 国家“863”计划基金资助项目(2006AA09A102-02)

作者简介: 周 杰(1982 -), 男, 硕士研究生, 主研方向: 数据采集与处理, 软件开发; 宋克柱, 副教授、博士; 曹 平, 博士; 程伊敏, 助理工程师

收稿日期: 2009-07-14 **E-mail:** jiezhou@mail.ustc.edu.cn

的用例图。

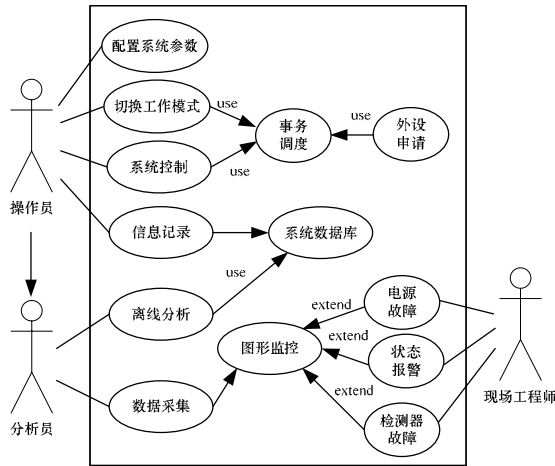


图1 主控软件用例图

对于主控软件来说，其核心功能有 2 个：(1)系统管理。可以细分为系统初始化、参数配置、工作模式选择以及对系统各节点和外设的控制和同步。软件对系统的管理由专门的事务管理模块执行，事务管理模块首先判断接收到的用户或系统节点申请的事务的优先级和可行性，然后决定是否提交软件内核处理。(2)质量监控。由于海上勘探耗资巨大，要在最短的时间内完成勘探任务必须保证每次作业都能采集到正确的数据，因此要求系统具备高实时的质量监控。主控软件给分析员提供在线和离线 2 种监控方式。当系统进入正常采集后，软件对采集到的振子数据、电源状态、拖缆状态、系统信息等数据进行计算和处理，然后进行直观的图形化显示，并提供故障报警。工作人员可以通过对实时图形的分析，掌握系统当前运行的状态，并通知工程师进行及时的现场处理。

3.2 软件的逻辑设计

UML 的逻辑视图从系统内部描述了如何实现用例图中提出的系统功能。它描述了系统的静态结构，也描述了系统内部的动态协作关系。设计采用类图和时序图分别对软件进行静态和动态的逻辑设计。图 2 为主控软件的高层类图。

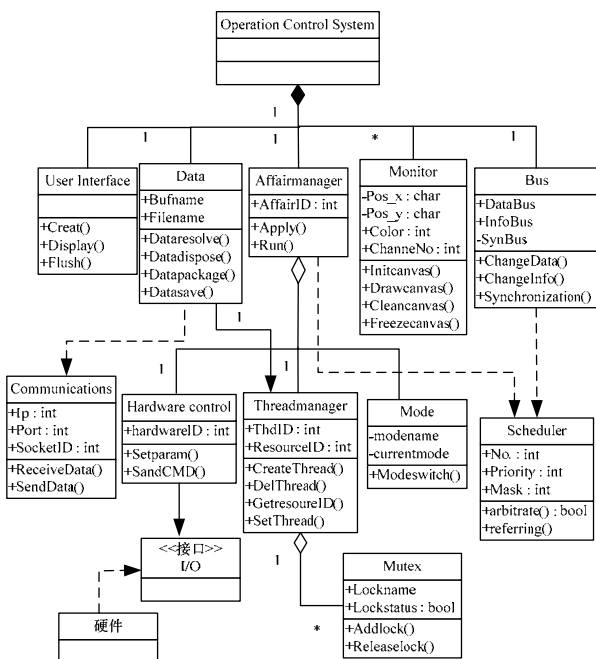


图2 主控软件类图

各个类对对象的行为以及类和类之间的交互共同实现主控软件的功能。主控系统类是系统的超类，它由界面类、数据处理类、事务管理器类、监控图类和总线类组成，这个对象初始化系统，装载所有任务集，然后由子类对象完成各个功能。数据处理类和事务管理类设计为活动类，其对象调用线程管理类来协调并行执行的多个线程，并保证临界资源和合理使用，增强了软件数据处理和并行事务处理的能力。调度器类负责事务和信息的仲裁，它的对象是各种调度算法，从而确保软件的实时性和可靠性。

时序图可以直观地描述系统内部的动态协作关系，为实现者提供一种动态的视角了解系统。图 3 是主控软件的控制序列时序图，系统工作顺序为：主控客户端软件启动后与采集和记录节点的服务器软件建立 socket 连接。接着主控软件初始化服务器端，同时服务器端将系统各部分的状态返回给主控，主控通过图形和日志的方式加以显示。在系统参数配置完成后，系统进入采集阶段，主控软件会开启数据线程和监控线程。数据线程完成数据的接收和命令的发送，以及数据的打包和解析，监控线程完成系统的状态信息和振子图的实时显示。在工作过程中，软件可以实现对系统的在线参数配置。停止命令将会使系统处于初始化状态，同时会重查系统的状态信息。

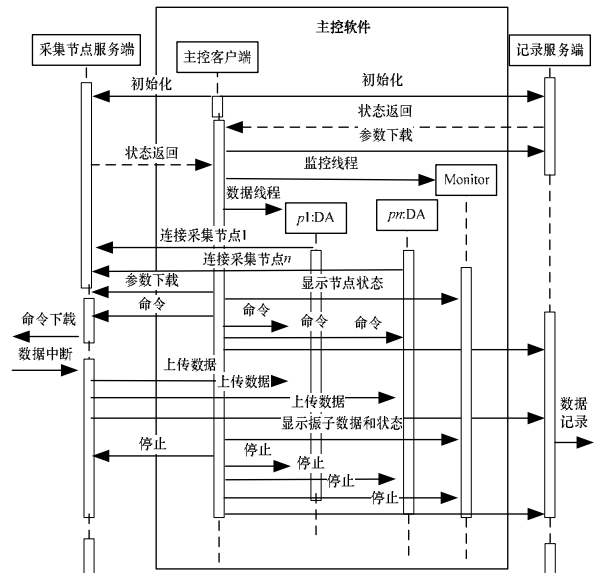


图3 控制序列

4 主控软件的开发和实现

软件的常用生命周期模型有 3 种：瀑布型，迭代型和增量迭代型^[3]。增量迭代开发模型的特点是在设计阶段将项目基于功能分成若干组件，然后分别对每一个组件使用瀑布型方法实现。主控软件采用了这种增量型的开发模型，在实际开发过程中，对于功能复杂的组件，如数据处理、事务管理等，进行了进一步的功能细化，从而形成一种嵌套的增量型开发方法，加快了软件的开发进度，提高了代码的可重用性。主控软件的实现主要使用以下 4 种关键技术。

(1) 模块化

软件根据增量型开发方法，将划分的各个组件视为不同的模块，这些模块具有独立的功能，并且相互之间互不影响。在软件类图中抽象的类即具备该特点，高层类对应软件高层模块，低级别的类对应软件细分模块。使用这种模块化的设计方法，使软件的调试和管理更方便，实现更灵活。

(2) 服务总线

软件使用一种服务总线，其思想类似与“硬件总线”。它将各模块连接起来，实现模块间的通信、同步和数据交换，增强了软件的管理能力，使整个系统具有更强的扩展性。服务总线平台如图 4 所示。

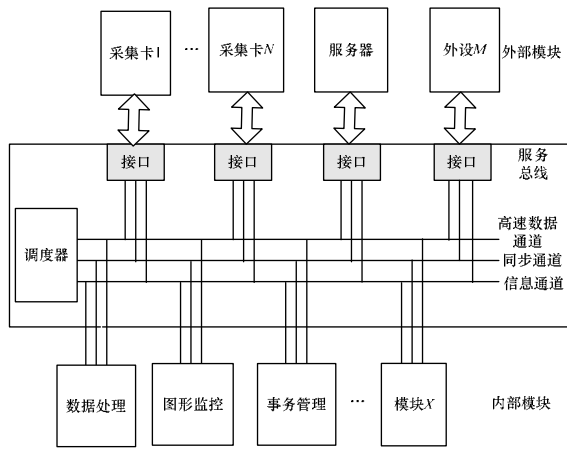


图 4 服务总线平台

服务总线对内负责软件内部模块间的同步和数据交换。服务总线定义了一套标准协议，每个试图与其他模块进行通信或数据传输的模块都必须使用这套协议。提出服务申请的模块首先发送信息协议给调度器，调度器经判选和仲裁后将信息转发到目标模块。若模块间要进行数据交换，则调度器在接收目标模块的返回成功信息后会在 2 个模块间开通直接的数据通道，这样数据不必通过调度器转发，从而提高处理效率。对于系统需要新增的功能，设计者只要将新模块按照总线的协议要求封装，挂载到服务总线上即可以使用，而不用改动原有的设计。

服务总线对外部设备体现为一种接口，实现了外部分布式模块的动态加载以及内外数据的通信。这样，外部模块的变化也不用受限于软件的束缚，只要通过标准的总线接口就可以加载到主控软件中进行通信。例如，系统多采集节点(多缆)对应多种不同的采集板卡，使用服务总线的接口，实现了硬件设备动态的加入和卸载，总线将自动识别加载模块信息，建立与软件内部模块对应的信息和数据通道，使得系统多缆采集的工作更灵活。

(3) 多线程并行处理

并行处理可以大大提高软件执行的效率，被大量应用在实时软件中。多线程处理技术是软件实现并行处理的方法之一，Linux 提供了基于 POSIX 标准的 Linuxthreads 库和内核级的线程调度方式，很好地支持多线程技术^[4]。主控软件在 Redhat Enterprise 4 系统良好的支持下，通过以下 3 次并行处理的细分，利用多线程技术，提高了软件的数据处理能力和实时性。

1) 多缆间的数据并行。每条拖缆通过各自对应的采集卡与主控软件交互。为了实现命令和参数的同步发送以及数据的同步上传，必须为各个采集节点设计单独的通道。为了避免命令与数据对通道的争用，影响系统实时性，对每个节点分别开辟命令通道和数据通道，这些通道间的通信将在不同线程中完成。

2) 数据流间的并行。主控系统内部数据流主要有 3 个：命令控制数据流，格式处理流和监控数据流。系统进入工作

状态后，3 个流向的数据同时进行。为了使每条数据流互不干扰地进行流通，将数据流进行区域划分，即将各个数据处理任务放在不同的线程中同时执行。

3) 数据流内部并行。监控数据流是系统的主数据流，正常 4 缆采集时数据净荷为 46.08 MB/s，若采用单线程则处理速度会明显滞后。软件将数据的接收、解析、计算和绘图显示这 4 个处理过程分别开辟各自线程，使它们可以分别相对独立的执行，加快数据处理能力。为了实现这种纵向的并行处理，必须开辟一些内存用于线程间数据传递。这些共享内存设计成一些环形缓冲器，缓冲器的大小由内核根据测线参数动态分配。数据存取基于生产者与消费者模型，并设定边界条件，从而保证缓冲器既不会写满又不会读空。

在主控软件中的互斥类通过共享内存、管道、信号量等技术，很好地完成了模块内部多线程间复杂通信和同步的处理，以及临界资源的管理。模块间的并行同步由服务总线的同步通道实现。另外，软件工作中还存在多线程事务提交问题，这由调度器类中的各种调度算法，根据线程的优先级、工作时间、资源状态等因素进行合理的分配。

(4) 优化绘图效率

主控软件使用 X Window/Motif 界面编程技术，实现数据的图形化质量监控。用户要求系统图形显示部分能够将地震数据以及各状态数据以颜色条的形式实时地显示，还要能够将数据直接用曲线、曲面或柱状图的形式显示。为了提高显示刷新的速度，软件在采用多线程并行绘图方案的基础上，进行以下 3 个方面的优化。

1) 优化图形刷新速度。在振子图的调试中发现，图形刷新的速度与数据扫描单位的大小有一定联系。扫描单位过大(刷新频率慢)或者过小(刷新周期大并且浪费系统调用资源)，刷新速度都不高。反复试验中发现，将数据从缓冲区中的抽取大小设定为某个大小时，刷新速度最快。例如在 0.5 ms 采样时，用 320 道作为一个扫描单位，即服务总线数据缓冲区中每次提取 320 道的数据送到绘图模块的高速缓存区(见图 5)，刷新效率最高，并且图形连续不会出现断裂现象。

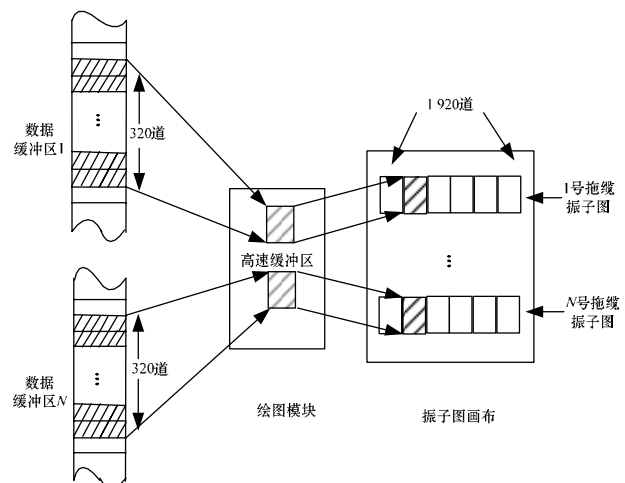


图 5 刷新策略

2) 数据显示的简化算法。以颜色条形式显示数据时，软件使用一种分段处理的简化算法。即将各种数据根据系统要求划分成若干等级区间，并映射到与区间数量相同的不同颜色上。只要将数值通过区间的比较得到对应的颜色索引值就可以直接用于绘图，而不需要将其转换成实际值。另外，考

虑到数据在时间以及空间上的关联性和局限性,使用当前通道各数据颜色的索引值作为下一通道的初始值,再进行比较排序,提高了计算速度。

3)优化绘图效率。显示新一炮数据之前,要将上一炮数据清空。一般采用重绘画布的方法。由于图形复杂,并且显示窗口可能要开多个,因此,该方法将有相当多的时间耗费在不断地重绘画布上。

本设计采用 X Window/Motif 中对暴露事件处理的一种巧妙方法。将画布初始化以后的图像保存在一个像素图 Pixmap canvas_pixmap_bak 中,在更新数据前,利用 X 库函数中 XCopyArea() 等函数将 canvas_pixmap_bak 中的内容拷贝到窗口中,这种方法节省了重绘的时间,使绘图整体速度大幅提升。

5 测试

整个系统在实验室环境中,通过嵌入式节点模拟的数据和平放在室内的电缆采集到的数据,进行测试。成功地进行了渤海(2008年5月)和南海(2008年10月)2次海上实地实验(用船载气枪阵列在海水中放炮,采集板在水中采集放炮和海底反射引起的海水振动噪声),获取了大量准确的数据。

在测试中,主控软件很好地完成了整个系统的控制和协调管理工作。在系统最大负荷(4×1 920道)时,仍能保证振子图形的实时显示,且刷新速度快,高效地反映了采集系统的工作状态,对了解作业情况、排除系统故障等起到很大的帮

(上接第 225 页)

```
<SOAP-ENV:Envelope
xmlns:SOAP-ENV="http://schemas.xmlsoap.org/soap/envelope/"...>
<SOAP-ENV:Header> ... </SOAP-ENV:Header>
<SOAP-ENV:Body>
<JMF...>
<Signal ID=" M081105213003" Type="Status >
...
</JMF>
</SOAP-ENV:Body>
</SOAP-ENV:Envelope>
```

4 结束语

JMF 消息通信是在兼容 JDF 的印刷制造系统中实现高效协同作业的关键技术之一。本文利用 Java 开发基于 Web 的胶印车间的信息集成原型系统,实现 JMF 消息通信。在后续的研究中,将针对 JMF 消息簇中其他各消息通信模式以及网

(上接第 228 页)

5 结束语

本文技术涉及 VTK 数据接口,在开发 VTK 应用系统或 VTK 过滤器中均为核心内容,因此,本文技术具有一定推广应用价值。

参考文献

- [1] 吴晓,龚时华,李斌,等.基于 OpenGL 七轴五联动车铣复合机床仿真系统研究[J].机械与电子,2005,(5):68-70.
- [2] 漆晓峰,陆鑫达.基于 VTK 的 CFD 数据可视化 Grid Service 设

助。经过长时间的海上实地实验,软件工作正常,未出现异常问题,充分地验证了系统的可靠性和稳定性。

上述测试结果表明,该监控系统软件在实时性、稳定性等方面完全满足石油勘探作业的要求,达到用户测试使用的要求。

6 结束语

使用 UML 进行软件建模,使系统设计清晰明了,开发时间大大缩短。采用模块化和软件总线的设计方法,使软件能更灵活地应对各种新的情况或要求,也为软件以后的维护和升级工作奠定了基础。测试结果证明,主控系统实时性强、运行稳定、扩展性好,现已投入使用。本软件的设计思路 and 实现方法对多通道、大数据吞吐率、分布式数据采集系统具有一定的参考和借鉴价值。

参考文献

- [1] 何汉漪.海上高分辨率地震技术及其应用[M].北京:地质出版社,2001.
- [2] Booch G, Rumbaugh J. UML 用户指南[M].2版.邵维忠,译.北京:人民邮电出版社,2006.
- [3] Sommerville I. 软件工程[M].程成,译.北京:机械工业出版社,2007.
- [4] Steven W R, Rago S A. UNIX 环境高级编程[M].尤晋元,译.北京:人民邮电出版社,2007.

编辑 陆燕菲

络通信的安全性进行更具体、深入的研究。

参考文献

- [1] Kipphan H. Handbook of Print Media[M]. Heidelberg, Germany: Springer-Verlag, 2001.
- [2] CIP4. JDF Specification Release 1.3[EB/OL].(2005-09-30).http://www.cip4.org/documents/jdf-specifications/JDF1.3.pdf.
- [3] 周世生,罗如柏,赵金娟.印刷数字化与 JDF 技术[M].北京:印刷工业出版社,2008.
- [4] CIP4. ICS-JMF-1.3[EB/OL].(2007-07-30).http://www.cip4.org/document_archive/documents/ICS-JMF-1.3.pdf.
- [5] 孙一林,彭波.Java网络编程实例[M].北京:清华大学出版社,2003.
- [6] 刘志都,贾松浩,詹仕华.SOAP 协议安全性的研究与应用[J].计算机工程,2008,34(5):142-144.

编辑 陆燕菲

计和实现[J].计算机工程,2005,31(3):195-197.

- [3] VTK Home page[Z]. [2009-05-11].http://public.kitware.com/VTK/.
- [4] 王晓宇,王平江,陈吉红,等.基于 VTK 的红外热图等温线提取[J].计算机应用与软件,2008,25(10):14-16.
- [5] Schroeder W J, Avila L S, Martin K M. The Visualization Toolkit: An Object Object-oriented Approach to 3D Graphics[M].3rd ed. New York, USA: Kitware Inc. Publisher, 2003.

编辑 陆燕菲