

基于 UML 的 EtherCAT 矿井电力监控系统实时性研究

王玉梅, 丁航

(河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000)

摘要: 针对矿井电力监控系统中存在的实时性差、可靠性不足的问题, 提出了采用以太网控制自动化技术 EtherCAT 为通信网络, 搭建煤矿井下供电系统, 并利用统一建模语言 UML 建立电力监控系统模型; 实验室条件下, 依据模型搭建系统实验平台, 对 EtherCAT 矿井电力监控系统实时性进行分析; 结果表明, 系统网络报文传输时延极小, 且故障切除实时性高, 能够为后续 EtherCAT 矿井电力监控系统开发提供技术支持。

关键词: 电力监控系统; 以太网控制自动化技术; 统一建模语言; 实时性

Research on Real-time Performance of Mine Power Monitoring System Based on UML and Ether CAT

Wang Yumei, Ding Hang

(School of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: In order to solve the problem of poor real-time and lack of reliability in mine power monitoring and control system, EtherCAT, an Ethernet control automation technology, is proposed as a communication network. UML is used to establish a power monitoring and control system model. Under laboratory conditions, based on the model building system experiment platform, the real-time analysis of the power monitoring system of EtherCAT mine was carried out. The results show that the network packet transmission delay is very small and the real-time fault removal is high. This system can provide technical support for the subsequent development of EtherCAT mine power monitoring system.

Keywords: power monitoring system; EtherCAT; UML; real-time

0 引言

煤矿井下电力监控系统为典型的分布式数据采集控制系统, EtherCAT 的应用能够解决传统矿井通信网络在确定性、实时性方面不足的问题^[1]。目前, 不少研究学者尝试将 EtherCAT 通信用于矿井电力监控系统构建井下高压综合保护器、电力监控主站和从站中解决供电系统越级跳闸等问题^[2-4], 然而对 EtherCAT 主从通信网络构架下分析系统整体实时性却未有涉及。

本文通过研究 EtherCAT 通信技术, 采用 UML (Unified Modeling Language, 统一建模语言) 对矿井电力监控系统通信网络静态结构与动态行为进行分析, 建立系统仿真模型, 并在实验室条件下搭建实验平台, 对 EtherCAT 通信网络架构下的系统实时性进行实验分析。

1 EtherCAT 井下通信网络

EtherCAT (以太网控制自动化技术) 隶属于 Realtime Ethernet (RET, 时以太网技术实), 由德国 BECKHOFF

于 2002 年开发, 然后于 2003 年 11 月通过组建 EtherCAT 技术小组发布其技术。另外, EtherCAT 是通过 IEC 标准 (IEC/PAS 62407) 和 ISO 标准 (ISO15745-4) 认证的国际标准协议, 具有优异的同步特性和性能。特别是, EtherCAT 协议提供了出色的以太网兼容性, 具有实现优异实时特性的优点, 例如可以在以太网中实现最大化带宽利用率等。EtherCAT 相较于传统现场总线技术和其余 RET (Ethernet POWERLINK、ProfiNet、SERCOS III、Ethernet/IP), 具有良好的开放性、高速的数据传输率、低廉的构建成本和简单的硬件组成等优点。EtherCAT 网络具有灵活的拓扑结构, 可选择搭建星形、环形、树形、混合型等多种形式进行组网^[5], 由于其不需要通过交换机就可以建立通讯, 可以有效避免传统 GOOSE 网受限于交换机数量及广播风暴发生的问题^[6]。

现今, 煤矿井下高压供电系统多采用一条进线带多条出线的干线式供电网络, 且存在供电级数多, 供电线路短的特点。煤矿井下电力监控系统为典型的分布式数据采集控制系统, EtherCAT 的应用能够解决如实时数传输、精准时钟同步、灵活拓扑结构等诸多系统问题, 同时以其微秒级实时传输效率, 可以有效提高系统数据传输效率。

根据井下放射型干线式供电网络配电点所在间隔及矿井电力监控系统特点。本文提出最简化“一主多从”的

收稿日期: 2018-01-17; 修回日期: 2018-03-13。

基金项目: 河南省科技攻关项目(112102210004)。

作者简介: 王玉梅(1963-), 女, 河南省辉县人, 硕士, 教授, 主要从事电力系统和供电技术方向的研究。

EtherCAT 环形通信网络架构作为井下监控系统数据通路，其结构如图 1 所示。

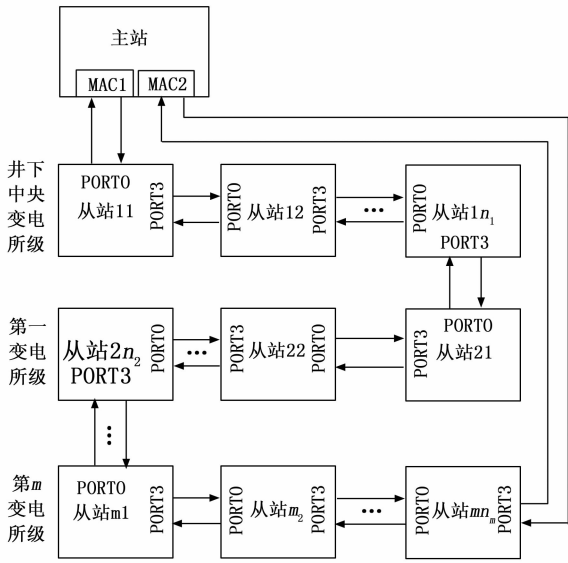


图 1 EtherCAT 井下监控网络

EtherCAT 井下环形监控网络，从站控制器（EtherCAT Slave Controller, ESC）的通讯端口为 PORT0、PORT1、PORT2、PORT3，其中 PORT0 和 PORT3 端口的工作状态为自动设定模式，自动设定模式下的 ESC 端口在检测到无相应链接时候会自动关闭，保证其它部分正常工作。EtherCAT 数据帧经过的路径依次为主站、从站 11、从站 12、...、从站 1n1、从站 21、从站 22、分站 2n2、...、分站 m1、从站 m2、...、从站 mm3，然后原路返回到主站，实现数据的采集。

2 EtherCAT 网络构架总体建模

以 EtherCAT 通信为对象，采用 UML 对整个矿井电力监控网络的需求、结构、状态、行为等各方面进行模块化分层设计，清晰地反映出网络中各模块间的关系。图 2 中系统总体建模可分为系统通信网络静态分析：系统功能需求用例图、接口类图、网络构架组件图；动态分析：数据配置活动图、数据传输序列图；根据 UML 分析建模，通过搭建实验仿真平台对该网络框架进行验证。

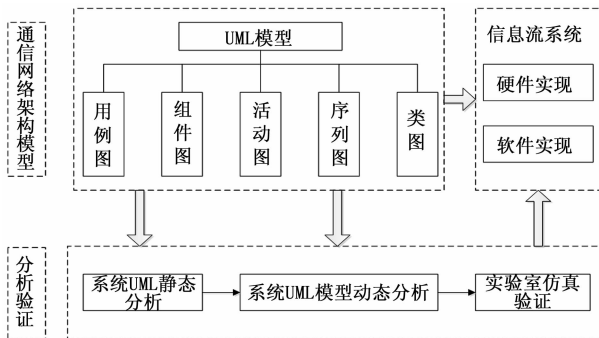


图 2 系统总体建模分析

3 UML 静态建模分析

在静态建模过程中，主要利用 UML 用例图、组件图和类图构建^[7]。

3.1 建立用例图

矿井电力监控系统通信网络主要功能完成操作人员、主站与从站三者之间数据的传输、处理、传输、控制和存储。除此之外，还有井下现场传感器设备实现信息的采集。从站相当于防爆开关中的综保器，对远程操作者或主站自动发送的控制命令进行执行^[8]。

通信网络是为网络连接的各模块服务，因此，需要分别从操作者、主站、从站和现场传感器设备的角度来实现其具体功能。如表 1 所示。

表 1 参与模块用例分析

参与模块	用例分析
操作者	初始化、数据采集、数据处理、输出控制、参数设置
主站	初始化、数据处理、输出控制、数据传输
从站	初始化、数据采集、数据传输
传感器设备	数据采集、输出控制

用例间总是存在着如泛化、包含和扩展等关系，所以经过需求分析确认的用例并非全部显现在用例图中。经过用例的分析找出用例间的关系和适合在用例图中使用的用例，在用例关系确定后，结合表 1，通信网络最终用例与参与模块的关系，如图 3 所示。

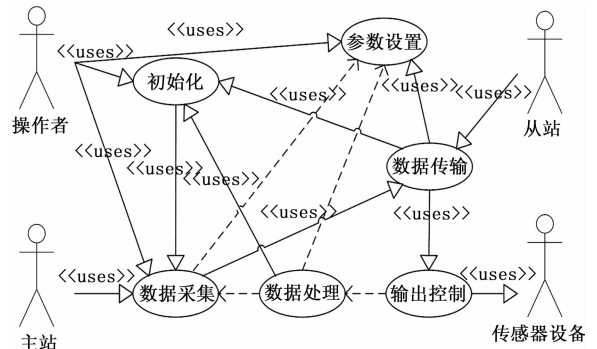


图 3 监控系统用例图

3.2 建立类图

类图是系统通信设计阶段关键一环，是实现用例的逻辑解决方案^[9]。分析系统整体用例图（图 3）可知，一个完整的基于 EtherCAT 矿井电力监控系统包含 EtherCAT 主站、从站与传感器设备，采用 UML 面向对象技术分析与设计系统中的各个类，其构成与关系如图 4 所示。

系统类包括：主站、从站、传感器设备与 EtherCAT 相关接口类，每个类中封装了不同对象的具体功能（体现用例需求），例如主站类中操作类型包括初始化、接收从站数据、处理数据、下发指令等操作，同时主站类直接调用 EtherCAT 相关接口类与通信网络中从站及传感器设备进行数据交互。

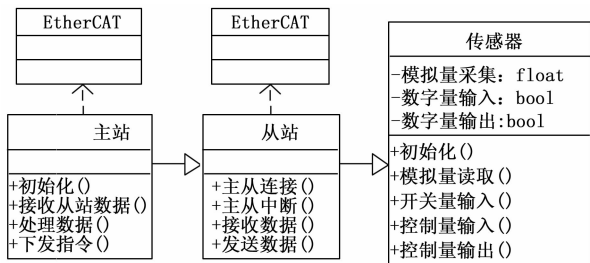


图 4 接口及实现类图

3.3 建立部署图

面向对象技术 (Object-Oriented Technology) 在实现系统物理建模有两种方式图, 即组件图与部署图^[10]。本文采用“部署图+组件图”描述系统通信网络总体框架。基于 EtherCAT 通信网电力监控系统的组件主要包括操作人员、主站、从站三部分。主站: 用户界面、网络接口、存储单元、数据库、EtherCAT 接口、驱动单元; 从站: ESC、从站微处理器和传感器模块。部署图用来建模通信系统上的物理部署, 主要涉及物理结构与它们间的关系, 如图 5 所示。

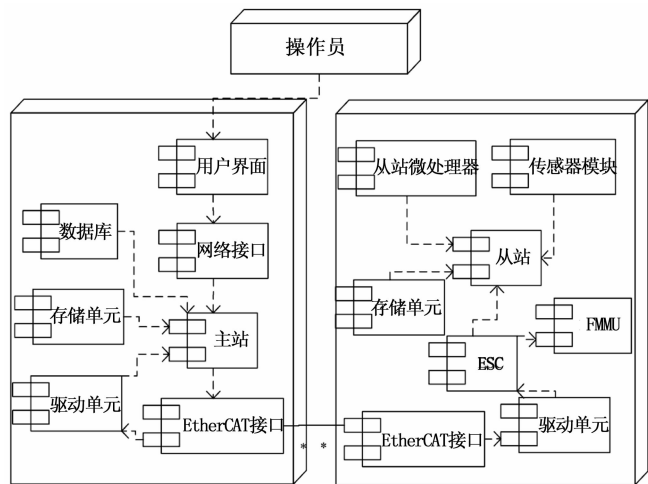


图 5 监控系统物理组件图

ESC 作为整个通信网络的“协议控制单元”, 是 EtherCAT 协议具象化的实体表现, 在通信网络中, 除首个从站以外, 其余每个从站 ESC 都必须以相应的规则对上一从站发送的数据帧进行接收、处理和发送, 处理方式根据数据帧中携带的相关指令来选择。对主站指令进行处理, 需要 ESC 提供一定的操作空间, 包括处理“控制”命令和选择主从通信通道的相关寄存器, 而且 ESC 可以通过“逻辑控制单元” (Fieldbus Memory Management Unit, FMMU) 完成主从“逻辑空间”到“物理空间”的关系映射。FMMU 位于每个 ESC 内部, 经主站配置后, 在激活通信网络过程中下发至从站, 当主站进行逻辑寻址, 可以根据数据帧中的逻辑地址和已经设置好的映射关系寻址到多个从站, 然后进行相应的操作, 所以 FMMU 有效减少了主从通信过程的系统用时。

至此, 系统通信网络的静态模型已经建立。在静态建模过程中, 首先对网络内各模块功能进行分析, 确定模块的用例及其之间的关系。然后, 通过部署图对系统通信网络物理方面进行建模, 确定通信网络内所有模块内部各个组件之间的关系, 完善静态模型, 为动态模型仿真验证铺垫。

4 UML 动态模型分析

UML 动态模型描述了系统通信网络内各模块动态行为的各个方面^[11], 利用活动图、序列图对系统进行动态分析建模。

4.1 系统活动图

矿井电力监控系统通信方式主要分为具有实时性的周期通信和非实时性邮箱通信 (Mailbox), 例如具有实时性的线路电流、电压模拟量监测和非实时性从站参数配置。系统通信可通过控制状态机状态改变分为初始化 Init、预操作 Per-operation、安全操作 Safe-operation 和操作 Operation 四种状态, 每一种状态下实现不同功能, 用 UML 活动图表示如图 6 示。

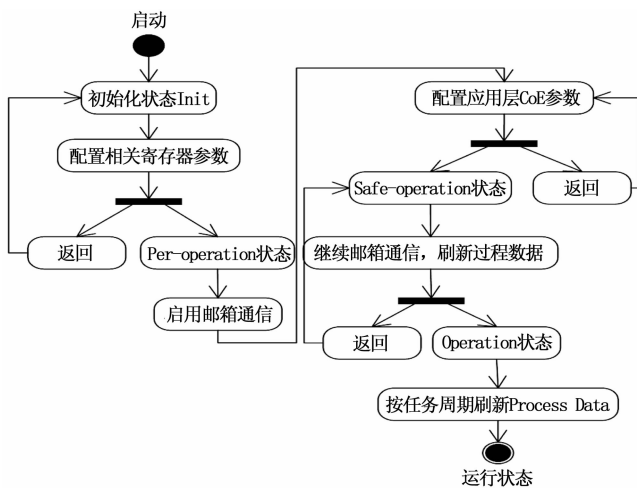


图 6 系统 UML 状态图

状态机在不同状态及状态转换期间具体操作为:

- 1) Init 状态, 服务层配置数据链路层信息寄存器、地址寄存器并且设置应用层控制寄存器, 配置用于邮箱通信 (Mailbox) 的同步管理器通道, 初始化分布时钟寄存器, 这个阶段主要是验证从站设备是否存在, 以及型号是否正确之后等待从站应用层确认;
- 2) Per-operation 状态, 启用 Mailbox, 主站配置用于 PDO 的 SM、FMMU、应用层状态请求寄存器, 同时进行状态转化, 等待状态确认;
- 3) Safe-operation 状态, 继续 Mailbox, 实现过程数据 PDO 通信, 并发起状态转换请求等待确认;
- 4) Operation 状态, 实现数据接收与传输的通信操作。

注意, 从站的状态不能高于主站。比如, 主站正在 Per-operation 状态, 从站不可能转换到 Operation 状态。通常情况下, 状态切换是固定的, 不受人操作影响。但在某

些特殊情况，比如，要修改从站的参数，而某些参数禁止在 Operation 状态下修改，这时就必须切换状态。

4.2 系统序列图

为了分析各模块间动态联系，体现对象间信息交互的时间顺序，以参数配置信息为例，建立系统启动过程中参数配置数据传输的 UML 序列图，如图 7 所示。序列图描述对象如何交互，有效反应消息传递情况，并将重点放在消息序列，清楚系统各模块如何交互^[12]。

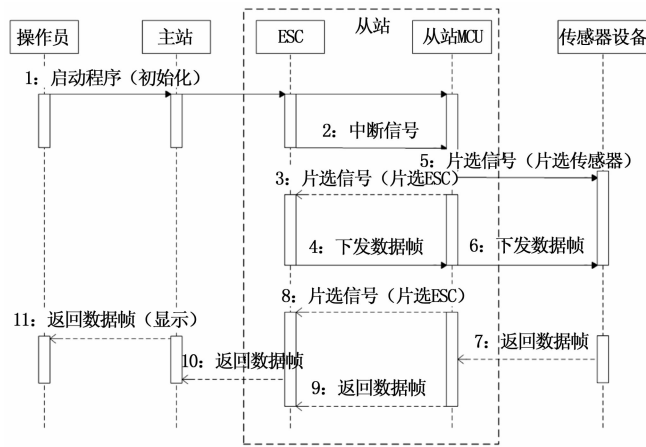


图 7 数据交互序列图

数据传输经过操作员、主站、从站（ESC 和从站 MCU）最后到达传感器设备，然后返回，其过程主要有：

- 1) 操作员通过 EtherCAT 主程序发送主站和从站之间的通信指令，并激活 ESC 内通信通道；
- 2) EtherCAT 帧传送到 ESC 时，ESC 向从站 MCU 发送中断信号；
- 3) ~4) 接收中断信号的从站 MCU 将 CS (Chip select, 片选信号) 固定到 ESC 并接收经由 ESC 发送的数据帧；
- 5) ~6) 从站 MCU 发送 CS 到硬件模块，然后传输数据；
- 7) ~11) 返回数据经过从站 MCU 片选到 ESC 模块，经过 ESC 模块传输，返回数据到达 EtherCAT 主站，完成系统整体启动。

5 系统实现及测试分析

5.1 实验平台

基于以上监控系统分析建模，以 Visual Studio.NET、TwinCAT 为开发工具，在 Windows XP 操作平台上制定了基于 EtherCAT 环形网络架构的煤矿井下电力监控系统。系统网络包括主站工控机、PLC 控制器从站、EtherCAT 环网和搭建的井下三级干线式供电网络。监控系统主站工控机装有直接内存存取 (Direct Memory Access, DMA) 功能的网卡，传输介质为标准的 5 类 UTP 线缆，并且通过 RJ45 接口连入 EtherCAT 总线网络中，工控机上运行监控软件，实现对供电网络的状态监测、继电器状态监测以及对从站挂载传感器硬件模块数值进行显示、处理和控

制；供电网络为典型的煤矿井下三级干线式，每一级分为一条进线和两条出线；通信网络为 EtherCAT 环形网络；从站由“协议芯片”ESC 和实现具体应用的从站微处理器 (Microcontroller Unit, MCU) 组成，其挂载传感器模块有模拟量采集、开关量输入、继电器控制和电源四个硬件模块，从站设备一共有 9 个，分布在供电系统网络不同进、出线位置。

5.2 实验结果分析

为了分析这种通信架构下系统的数据传输实时性，对比测试了两种典型情况下数据传输性能：

- 1) 正常情况下主从模拟量数据传输时延；
- 2) 短路故障情况下主从数字量数据传输时序。

下面，在实验室仿真平台上对以上两种情况进行测试并对结果进行分析。

首先，利用自耦变压器得到幅值为 60 V 的三相电压，在 TwinCAT PLC Control 中设置系统数据采集频率为 1000 Hz，启动系统。接着，在正常通信情况下采用 WireShark 抓取主站与第三级供电系统网络最后出现处从站（系统连接的第 9 个从站）之间的数据包，如图 8 所示。

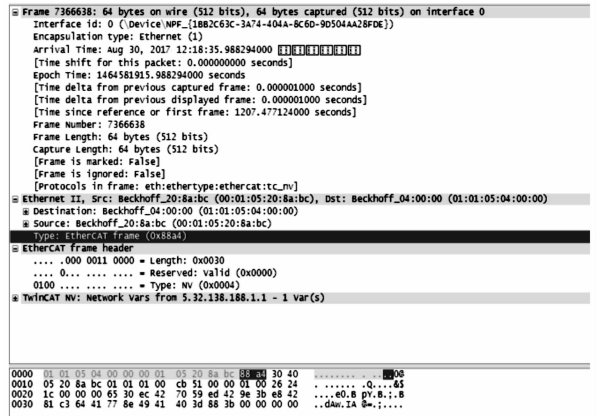


图 8 WireShark 抓包结果显示

该报文共 64 字节，首先是 14 字节的网络头，其中包括 6 字节源地址、6 字节目的地址、2 字节 EtherCAT 网络类型；然后是 EtherCAT 数据，其中包含 2 字节 EtherCAT 帧头 (在图中蓝底显示区)，可以看到帧头为 EtherCAT 报文专用帧类型 0x88a4，子报文工作计数为 2 字节。由图中可以看出，在正常情况下，数据报文延时为 1us，且经过对不同位置从站进行抓包分析可得，从站位置不同对系统响应时间几乎没有影响。

最后，设置从站 32 处发生 ac 两相短路故障，利用 TwinCAT Sampling Trace 功能对主从数字量数据传输时序进行测试分析，如图 9 所示。

在第 $t_1 = 615$ ms 时主站接收到的电流数据开始变大，表示发生了短路故障，同时从站向主站上送的故障信息由 0 变为 1，表示第三级配点出线过流信息。在第 $t_2 = 660$ ms 时电流开始变小，从站向主站上送的故障信息由 1 变为 0，故障信息消失。在忽略继电器固有动作时间的情况下，从

