

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。

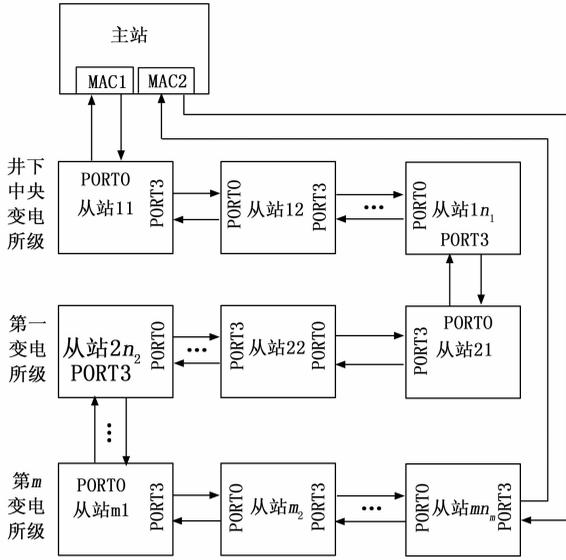


图 1 EtherCAT 井下监控网络

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。

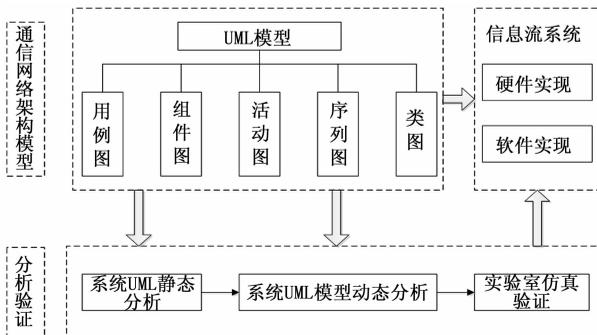


图 2 系统总体建模分析

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。

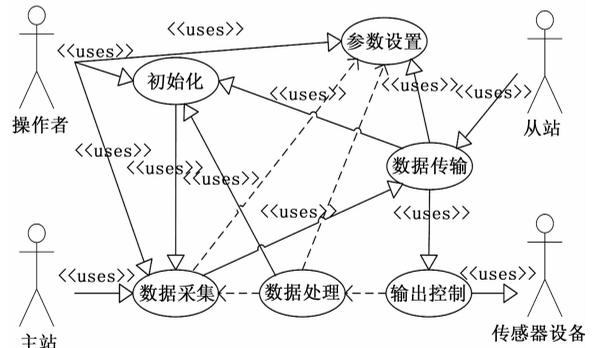


图 3 监控系统用例图

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。

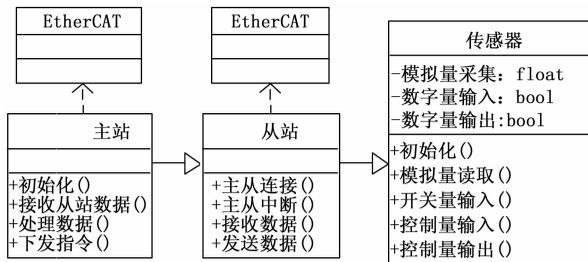


图 4 接口及实现类图

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。

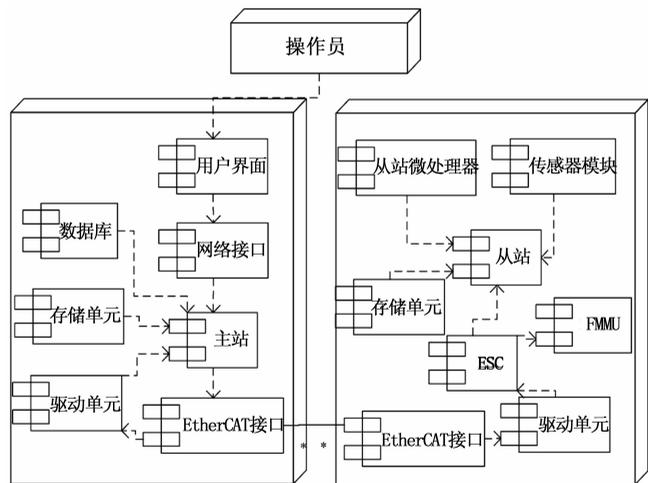


图 5 监控系统物理组件图

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, FMU) 完成主从“逻辑空间”到“物理空间”的关系映射。FMU 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 FMU 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。

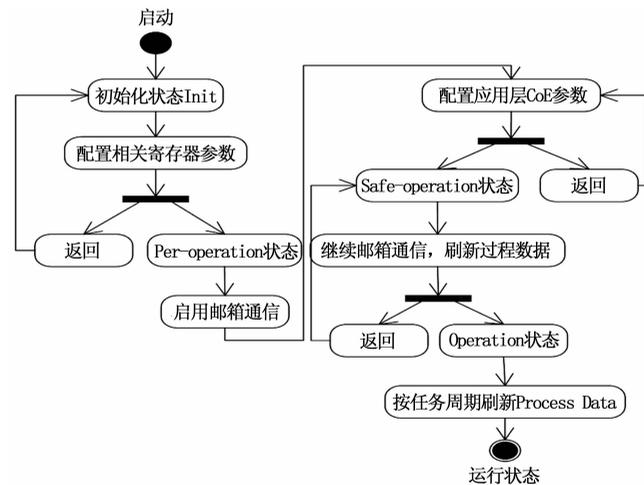


图 6 系统 UML 状态图

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、FMU、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

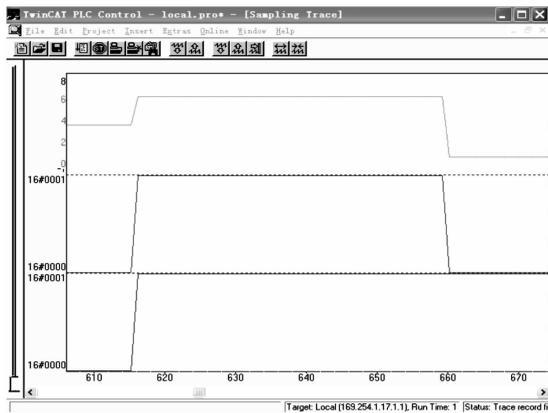


图 9 故障信号传输时序图

检测到故障信息到发出跳闸指令完成故障切除, 一共耗时:

$$t_1 - t_2 = 45 \text{ ms}$$

按照相关要求, 井下发生短路故障时, 排除时间不得大于 200 ms, 经过多次对不同从站实验分析可得: 短路故障情况下主从数字量数据时序传输用时极短, 数据传输效率高。

实验结果分析: 在正常通信与故障发生时, EtherCAT 通信网络都能够实现主站与从站之间的实时通信, 尤其在故障发生情况下, 系统数据传输实时性表现优异。

6 结语

本文通过对 EtherCAT 主从通信模式研究, 结合实际井下配电系统情况, 提出采用 EtherCAT 环形网络最简化网络拓扑结构, 并采用 UML 建立系统通信网络模型, 在实验室完成仿真平台搭建, 验证系统通信实时性。实验结果表明 EtherCAT 应用于煤矿井下电力监控通信网络系统中具有很高的通信实时性, 能够为后续基于 EtherCAT 通信网络的煤矿井下电力监控系统发展提供技术支持。

(上接第 52 页)

组件备件, 从而使得维修新一代天气雷达故障变得便捷高效, 即使是非专业的机务保障人员也能快速维修新一代天气雷达设备故障。

3) 本文提出的新一代天气雷达开关和触发器组件快速检修系统研制完成后在海南省多个台站得到了应用, 根据其实际应用实例, 结果表明其效果良好, 可以为全国其他新一代天气雷达站快速维修新一代天气雷达提供一定的借鉴和参考。

参考文献:

[1] 陈忠勇. CINRAD/SA 充电开关控制板工作原理及应用维护 [J]. 气象科技, 2013, 41 (2): 250-253.
 [2] 陈忠勇, 程昌玉, 李力. CINRAD/SA 发射机放电触发控制器的电路分析及维修 [J]. 气象科技, 2014, 42 (6): 969-972.

参考文献:

[1] Gianluca C, Ivan C B, Stefano S, et al. Evaluation of EtherCAT Distributed Clock Performance [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2012, 08 (01): 20-29.
 [2] 王磊, 李木国, 王静, 等. 基于 EtherCAT 协议现场级实时以太网控制系统研究 [J]. 计算机工程与设计, 2011, 32 (7): 2294-2297.
 [3] 李木国, 王延国, 孙慧涛. 基于 EtherCAT 总线的串联型分布式数据采集系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2016, 06 (24): 195-198.
 [4] 王玉梅, 张国治. EtherCAT 井下监控网络可靠性分析研究 [J]. 计算机仿真, 2015, 32 (05): 331-335.
 [5] 孙继平. 煤矿安全生产监控与通信技术 [J]. 煤炭学报, 2010, 35 (11): 1925-1929.
 [6] 叶枫, 夏阳, 申朝祥, 等. 基于动态行为建模的 CPS 计算实体建模方法 [J]. 系统仿真学报, 2016, 28 (05): 1003-1008.
 [7] 刘建航, 程学珍, 郑宸, 等. 基于 UML 和 Petri 网的网络化传感系统模型研究 [J]. 传感器与微系统, 2015, 34 (07): 44-47.
 [8] 王玉梅, 赵宏卫. 基于 TwinCAT 和 VC++ 的煤矿井下数据采集系统研究 [J]. 测控技术, 2015, 34 (12): 113-115.
 [9] 曾星星, 张德智, 陈朝霞, 等. 基于 UML 智能测控通信系统仿真平台的开发与应用 [J]. 测控技术, 2017, 36 (01): 08-111.
 [10] 蒲洪彬, 许阳钊, 李伟光. 基于 UML 的数控软件系统建模 [J]. 机床与液压, 2010, 38 (01): 98-100.
 [11] 余存, 黄利军, 黄浩然, 等. 基于 UML 状态图和 Qt 状态机框架的 IEC104 规约的分析与实现 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (15): 118-125.
 [12] 高雪娟, 武晓春. 应用 UML 顺序图的联锁测试用例生成方法 [J]. 计算机应用研究, 2013, 30 (09): 2740-2743.
 [3] 陈忠勇, 王宏记, 周若. CINRAD 发射机后充电校平器 3A8 工作原理及维修 [J]. 气象科技, 2012, 40 (4): 563-566.
 [4] 姜小云, 吴俞. 新一代天气雷达数据传输与短信值机系统 [J]. 气象科技, 2016, 44 (5): 733-738.
 [5] 姜小云, 吴俞. 新一代天气雷达基数据管理与个例整编系统设计 [J]. 气象科技, 2015, 43 (4): 612-616.
 [6] 姜小云, 吴俞, 李静. ASOM 二次监控平台设计 [J]. 气象科技, 2013, 41 (3): 480-483.
 [7] 姜小云, 李昭春, 吴俞. 新一代天气雷达远程故障诊断与应急维修应用探讨 [J]. 干旱气象, 2016, 34 (1): 376-381.
 [8] 李勇, 黄丹萍, 王静. 新一代天气雷达发射机速调管失效判断 [J]. 气象科技, 2010, 38 (3): 344-346.
 [9] 吴少峰, 项颂翔, 胡东明, 等. CINRAD/SA 发射机典型故障分析处理 [J]. 气象科技, 2012, 40 (3): 358-362.
 [10] 吴少峰, 胡东明, 黎德波, 等. CINRAD/SA 雷达开关组件故障分析处理 [J]. 气象科技, 2009, 37 (3): 353-355.