



原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的科研成果。对本文的研究作出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本声明的法律责任由本人承担。

论文作者签名：冯善强 日期：2010.04.15

关于学位论文使用授权的声明

本人同意学校保留或向国家有关部门或机构送交论文的印刷件和电子版，允许论文被查阅和借阅；本人授权山东大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文和汇编本学位论文。

(保密论文在解密后应遵守此规定)

论文作者签名：冯善强 导师签名：梁军 日期：2010.04.15

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 课题的背景和意义	1
1.3 课题的研究现状	2
1.3.1 传统继电保护测试技术的发展	2
1.3.2 数字化继电保护测试技术的发展	5
1.4 论文的主要工作和章节安排	6
第二章 数字化变电站技术介绍	7
2.1 概述	7
2.2 IEC 61850 标准简介	7
2.2.1 IEC 61850 的基本内容	8
2.2.2 IEC 61850 的核心技术特点	9
2.3 数字化变电站过程层设备	10
2.3.1 电子式互感器	10
2.3.2 合并单元	12
2.3.3 智能断路器装置	13
2.4 数字化变电站过程层通信	15
2.4.1 发布者/订阅者通信结构	15
2.4.2 报文传输实现机制	16
2.4.3 数字化变电站过程层构成方案	20
2.5 本章小结	21
第三章 实时数字仿真系统的建立	23
3.1 MATLAB 实时仿真方法的选择	23
3.1.1 Simulink 仿真介绍	23
3.1.2 Real-Time Workshop 简介	24
3.1.3 实时仿真解决方案的选择	25
3.2 xPC 实时仿真技术基础	26
3.2.1 xPC Target 实时仿真机制	26

3.2.2 xPC Target 的实时以太网通信功能	27
3.2.3 xPC 支持 Simulink 自定义模块	29
3.3 数字化变电站过程层数字实时仿真的实现	29
3.3.1 总体方案	29
3.3.2 合并单元模块的组建	30
3.3.3 智能断路器控制模块的组建	34
3.4 本章小结	36
第四章 数字保护测试系统的开发	37
4.1 测试系统总体结构	37
4.2 典型测试系统方案	38
4.3 图形用户界面的开发	41
4.3.1 MATLAB 计算引擎简介	41
4.3.2 测试系统图形用户界面设计	42
4.4 数字式继电保护装置的测试流程	44
4.4 本章小结	45
第五章 测试系统功能与性能的检验	47
5.1 测试系统的功能要求	47
5.2 测试系统的性能要求	47
5.3 测试系统功能与性能的检验	48
5.3.1 合并单元性能测试	48
5.3.2 GOOSE 性能测试	50
5.3.3 集成测试	52
5.4 本章小结	57
第六章 总结与展望	59
附录	61
参考文献	64
致 谢	68
攻读学位期间发表的学术论文	69

摘要

光电技术在传感器应用领域研究的突破, IEC 61850 标准的颁布实施, 以太网通信技术的应用, 以及智能断路器技术的发展, 为变电站综合自动化技术进入“数字化变电站”时代提供了技术支撑。随着这些新技术的应用, 基于 IEC 61850 标准的继电保护装置(本文称为数字化继电保护装置)不断得到推广, 同时新型数字化保护装置的性能测试也面临着新的挑战。因此深入研究数字化保护的测试方法, 并开发新型的继电保护测试系统, 有着十分重要的现实意义和应用价值。

首先, 论文分析了数字化保护装置的测试要求和当前继电保护测试的解决方案, 确立了开发实时数字仿真测试系统的研究方向, 介绍了数字化变电站的相关应用技术, 包括: IEC 61850 标准的基本内容和主要技术特点, 电子式互感器、合并单元、智能断路器的工作原理, 数字化变电站过程层通信机制和构成方案等内容。

在此基础上, 论文讨论了基于 MATLAB 建立实时闭环仿真系统的多种解决方案的优缺点, 选取了 xPC 双机实时仿真机制作为本系统的开发基础。利用 MATLAB/Simulink/xPC 双机实时仿真机制及其实时以太网通信功能, 通过搭建合并单元和智能断路器控制单元的仿真模型, 实现了实时电力系统仿真和基于 IEC 61850 的实时数字通信, 包括采样值报文的发送和 GOOSE 报文的收发。利用双向通信功能实现了闭环仿真。

随后, 论文在所建立的实时仿真系统基础上, 开发了数字式继电保护测试系统。介绍了本测试系统的总体结构和软硬件环境, 阐述了满足测试要求的典型测试系统的搭建过程, 完成了基于 MFC 和 MATLAB 引擎的图形用户界面的开发, 制订了使用本测试系统进行数字继电保护装置测试的流程。

最后, 在分析数字继电保护测试系统所应具有的功能和 IEC61850 对测试系统的通信性能要求的基础上, 对本测试系统进行了三方面的测试, 包括合并单元性能测试、GOOSE 性能测试和整个系统的集成测试。测试结果表明, 本系统运行正常, 满足 IEC61850 的通信性能要求, 能够为数字继电保护装置提供稳定可靠的实时闭环测试环境, 达到了课题的预期目标。

关键词：IEC 61850；数字化变电站；数字实时仿真；数字化保护装置；保护测试

ABSTRACT

With the breakthrough of opto-electrical transducer technology, the publishment and implement of IEC 61850, application of Ethernet network, and development of intelligent breaker, technology of substation automation system is stepping into "digital substation" stage. These new technologies above have brought significant reform to substation automation system, and the protection equipments based on IEC 61850 (called digital protection in this paper) are popularized more and more, which brings new challenges to relay device testing. Therefore it has important practical significance and great applied value to research digital protection testing methods and develop new testing systems.

After analyzing the requirement of digital protection test and current testing solutions, this paper first chose the development of real time digital simulation testing system as the research orientation. Simultaneously, this paper introduced the applied technology of digital substation, which includes the contents and characteristics of IEC 61850, the working principle of electronic transducer, Merging Unit and Intelligent Breaker, the communication mechanism and structure of process level in digital substation.

Based on above, the paper discussed several ideas to establish an available real time closed-loop testing system based on MATLAB, and then selected the xPC dual system as the basement of the system. Utilizing the real time simulation system of xPC and its Ethernet communication function, the paper built simulation models of Merging Unit and Intelligent Breaker, which helped to realize the real time simulation of power system and digital communication corresponding IEC61850. With the aid of Sampled Values message and GOOSE message, a closed-loop testing system was constructed.

Then, based upon the simulation system constructed above, the paper developed a digital relay protection testing system, via introducing the process of building typical testing system, the development of GUI with MFC and MATLAB engine, and the testing flow of using this system.

At last, analyzing its function requirements and communication performance ruled by IEC61850, the digital protection testing system was evaluated in the paper, including

Merging Unit performance test, GOOSE performance test and integration test. Result of the evaluation showed that the system worked smoothly and the communication performance was corresponding to IEC61850. Eventually, target of the research topic was achieved.

Key Words: IEC 61850, digital substation, real time digital simulation, digital protection device, relay testing

第一章 绪论

1.1 引言

20 世纪 90 年代以来,随着电子技术、信息技术、网络通信技术的发展,以微处理器为核心的智能化自动装置在电网控制领域得到了广泛的应用,促进了变电站综合自动化技术的快速发展,提高了变电运行的安全性和可靠性。但是,传统的变电站综合自动化系统在保障电网安全、经济运行的同时,由于存在着装置功能独立、缺少协同操作、信息数据利用率低等问题,“信息孤岛”现象日益突出,遭遇到了发展的“瓶颈”^[1,2]。

为解决上述问题,相关部门及专家学者进行了广泛而深入的研究,并取得了一定成果,如以光电技术为基础的新型互感器正从试验阶段走向工程应用,明确规定了变电站信息采集、处理、传输及应用框架的 IEC 61850 标准也已颁布实施。另外,光纤网络通信、高速以太网交换以及一次设备操作智能化技术的发展也为变电站综合自动化技术向着“数字化”方向发展提供了重要的技术支撑。变电站综合自动化技术进入了“数字化变电站”^①时代^[3-5]。

1.2 课题的背景和意义

数字化变电站的结构体系和通信方式较常规变电站均发生了较大变化。按照 IEC61850 标准,数字化变电站的一、二次设备分为 3 层,即站控层、间隔层和过程层,相邻层设备之间采用以太网通信模式。其中,电气量信息和控制信息的传输方式均发生了根本性的变化。在传统变电站中,互感器、操作箱与保护、测控设备之间的信息传输均采用二次电缆的连接方式,传输的是模拟量。而在数字化变电站中,在过程层就已实现了模拟量向数字量的转换,设备之间通过光纤通信,信息的传输均已实现数字化。电子式互感器完成模数转换后通过合并单元向间隔层设备发送采样值报文,保护、测控设备通过以太网接收采样值报文,跳闸、联闭锁信号则采用 GOOSE 报文传输,智能断路器则可以直接接收二次设备的控制命令并实时上送断路器的位置状态信息。这一系列技术的推广给变电站内二次设备

注:①本文将符合 IEC 61850 标准的变电站和继电保护装置分别称为“数字化变电站”和“数字化继电保护装置”(或“数字保护”),后文中将不再进行说明。

的信息应用模式带来巨大的变化，继电保护等二次设备由于不再需要模拟量接口和转换模块（即传统的数据采集系统），硬件结构得到大大简化；同时符合 IEC 61850 标准的二次设备可以直接获取并使用电子式互感器发送的系统运行信息，通过对实时电流、电压信息的计算、比较和判断，即可完成相应的保护和测控功能，装置的可靠性和实时性得到提高^[6]。

数字化变电站技术的发展，特别是信息传输方式的改变使得智能电子装置的研发、调试和检测技术以及变电站自动化系统的工程实施、运行、检修和更新模式都带来了巨大的变化。

为验证新的控制和保护等装置的性能，在装置安装、投运之前需要进行实时测试，以确定其是否满足功能和性能要求。目前，继电保护装置的测试主要借助于继电保护测试仪、动模试验室和实时数字仿真器来完成^[7-10]。实时数字仿真相比继电保护测试仪和动模试验，具有不受原型系统规模和结构复杂性的限制，能保证被研究、试验系统的安全性，具有良好的经济性、方便性等优点，成为物理装置的试验研究和实时测试的重要形式。如前文所述，数字化变电站通信方式的改变对基于实时数字仿真器的继电保护测试方法提出了新的要求。因此，研究适应数字化变电站技术要求的实时数字仿真方法并将其应用于智能电子装置的开发与测试具有重要的现实意义。

本课题根据数字化变电站技术研究和新型数字化保护设备检测的要求，在研究数字化变电站相关技术的基础上，基于 MATLAB 软件建立了数字化变电站实时仿真平台并搭建了数字保护测试系统，具有较好的经济性和较高的实用性。

1.3 课题的研究现状

1.3.1 传统继电保护测试技术的发展

微电子技术、计算机技术与通信技术的飞速发展使继电保护技术不断地注入新的活力。当前，微机继电保护装置发展成为继电保护装置的主要形式。为适应微机继保的发展，继电保护测试技术也向着不断提高测试效率和提供更加真实的测试环境的方向发展。

传统继电保护装置（非 IEC 61850 的继电保护装置）测试的典型测试方案如图 1-1 所示。测试装置提供电压电流信号给被测装置，部分测试装置能够接收被测装置的状态信息实现闭环测试，检测设备接收被测设备动作信息并对其功能和性能

作出评价。根据测试信号模拟电力系统状态的真实程度，将继电保护测试划分为稳态测试、动态测试、暂态测试和实时闭环测试^[11-19]。

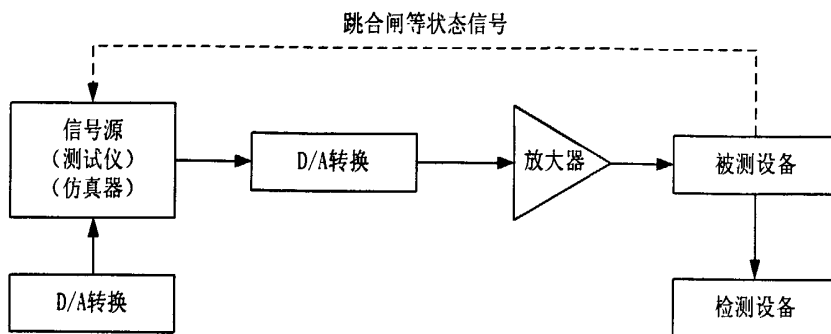


图 1-1 传统继电保护测试方案

（一）稳态测试

文献 12 给出稳态测试定义：给受测保护装置输入交流相量，缓慢调节电流而保持电压不变，或缓慢调节电压保持电流不变，直到动作临界值使保护装置动作。稳态测试是基于相量的测试，其输入信号为工频基波信号，稳定、单一，不能真实模拟电力系统运行状态。适用于对保护某一功能检验和整定值校验，难以对保护的整体性能进行测试评估。

（二）动态测试

动态测试与稳态测试类似，只考虑基波分量，也是基于相量信号，但与稳态测试相比，具有以下特点：

- ①多状态，测试输入信号包括故障前、故障时、故障后三种状态；
- ②输入信号阶跃变化，不包括暂态过程；

动态测试信号量通过短路计算程序获取，易于通过常规设备实现，因而广泛用于典型试验。需要注意的是，动态测试没有考虑状态之间的转换过程，模拟电力系统运行状态不够真实，对高速继电保护装置的测试会产生不利影响。

（三）暂态测试

与前述两种测试技术相比，暂态测试考虑谐波和非周期分量的影响，能对电力系统的扰动状态进行较真实的模拟，从而对保护的整体性能进行更准确的评估。

工程实际中，暂态测试可应用于继电保护的整定值的验证，还可用于继电保护误动作原因的分析。暂态测试信号的主要来源于现场故障录波图或离线数字仿真软件，如 EMTP、EMTDC 等。

（四）实时闭环测试

实时闭环测试一般通过仿真系统实现，包括动态模拟和数字仿真两种形式。实时数字仿真系统中，单点状态量的计算时间小于或等于时间仿真系统的步长，远远小于采样周期，如实时数字仿真器 RTDS 的时间步长最小可达 50us，这就为信号的实时性提供了保证，从而能更好地模拟电力系统的各类动态过程。

继电保护实时闭环测试中，一般采用反馈通道形成闭环测试，使测试系统结合被测保护装置的实时状态信号（如跳闸信号、重合闸信号）运行下一步仿真程序。实时闭环测试可以模拟系统各种类型的故障，也能模拟转换性故障，因而对保护装置的性能测试更加真实全面。

不同用户在不同场合对继电保护测试技术和测试系统的要求是不同的。目前，继电保护装置的测试主要借助于继电保护测试仪、动模试验室和实时数字仿真器来实现。继电保护测试仪可以实现稳态测试、动态测试以及包含较低次谐波分量的暂态闭环测试，而对信号精度要求更高或者需要更加真实的系统环境测试的情况下必须借助于动模试验室或实时数字仿真器，如 RTDS 等。

动模试验的优点是可以较真实的反映被研究系统的全动态过程，现象直观明了，物理意义明确，缺点是仿真的规模受实验室设备和场地限制，而且每一次不同类型的试验都要重新进行电气接线，耗力耗时，可扩展性和兼容性差。

实时数字仿真的优点是不受被研究系统规模和结构复杂性的限制，计算速度快、使用灵活、扩展方便、成本相对低廉，是当前电力系统仿真系统发展的主要方向。它不仅是研究电力系统规划、设计和运行的强有力工具，而且通过高速通信系统及信号放大、转换系统与实际的保护和控制装置相连，对电网中继电保护装置、安全自动装置及一些测控装置进行实时测试，也能对电网中的各种故障和稳定特性进行深入分析，提供技术支持，对系统网络的安全稳定性进行评估。

在上世纪 90 年代初，加拿大 Manitoba 直流研究中心 RTDS 公司率先推出国际上第一台电力系统全数字实时仿真系统（RTDS），RTDS 的核心软件是 EMTDC。随后，加拿大魁北克水电研究所的 TEQSIM 公司也开发了电力系统实时仿真系统（HYPERSIM），主要用于电力系统电磁暂态仿真，其核心软件是 EMTP 程序。法国电力公司（EDF）开发的 ANENE 实时仿真系统，其核心软件也是 EMTP。由殷图科技发展有限公司、东北电力调度通信中心和清华大学联合研制、开发的数字动态实时仿真系统（Digital Dynamic Real Time Simulator，简称 DDRTS），是国内

自主研发的实时数字仿真系统。DDRTS 集系统仿真和实时测试功能于一体，利用实时数字仿真技术，可以对实际装置进行全面的闭环测试。DDRTS 的主要功能是对线路和元件保护进行测试，其仿真规模较小。随着计算机技术、数值计算和通信技术的飞速发展，数字仿真技术得到很大的发展，中国电力科学研究院开发了世界上首套可模拟大规模电力系统（1000 台机、10000 个节点）的全数字实时仿真装置 ADPSS，大规模电力系统的实时数字仿真也得以实现。

1.3.2 数字化继电保护测试技术的发展

数字继电保护装置测试的典型测试方案如图 1-2 所示。测试装置提供给被测装置符合 IEC61850 9-1/9-2 标准的电压/电流采样值报文，并接收被测装置发出的 GOOSE 开关量报文，实现闭环测试。

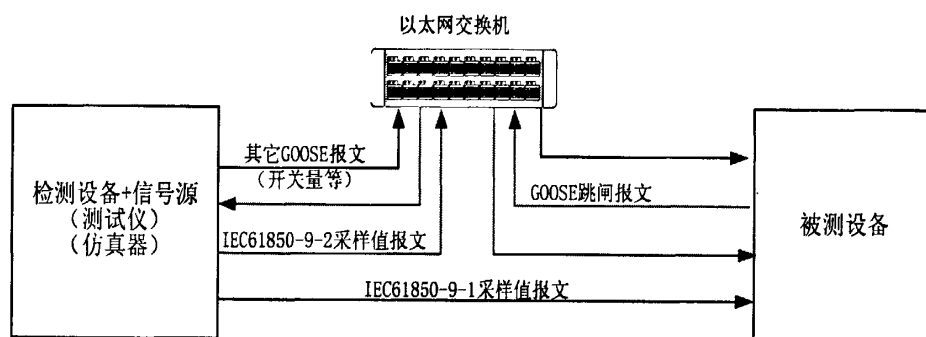


图 1-2 数字继电保护典型测试方案

相比较传统继电保护装置，数字继电保护装置的测试主要是测试信号的形式发生了改变。在传统继电保护技术的基础上加入数字通信手段即可实现面向数字保护装置的测试。针对数字保护装置测试的解决方案，国内外均已进行了大量的研究开发工作，包括光继电保护测试仪的研制、动模试验室的数字化改造以及实时数字仿真器的数字化升级等^[20-30]。

目前，国内外均已较为成熟的光继电保护测试仪，以北京博电新力公司的 PWF 系列、广东昂立公司的 F 系列以及奥地利 OMICRON 公司的 CMC 256plus 系列为代表，在数字化变电站的建设和调试中发挥了巨大的作用；文献 24 通过在动模试验室的基础上加入电子式电流互感器、合并单元和智能操作箱等数字化设备，完成了动模试验室的数字化改造，并取得了预期的效果；文献 26 利用新的 GTNET 模块实现了以太网通信，完成了 RTDS 仿真系统的数字化升级。针对于其他较为成熟的实时数字仿真系统（如 ADPSS、DDRTS 等）的数字化升级，目前仍没有相关文献或研究成果发布。

鉴于实时数字仿真在继电保护测试中的重要地位，而当前商业实时数字仿真系统较非实时仿真软件价格昂贵且数字化升级较为复杂的现状，研究如何在常用非实时仿真软件的基础上实现实时数字仿真和数字化通信，从而满足数字保护的测试要求，具有良好的经济性和实用价值。

1.4 论文的主要工作和章节安排

本论文在研究电力系统实时数字仿真、IEC 61850 标准以及数字化变电站应用技术的基础上，研究了在 MATLAB 基础上实现实时数字仿真的方法，开发了基于实时数字仿真的数字保护测试系统，并完成了本测试系统的功能和性能的检验。

具体包括以下几部分内容：

①理解了 IEC 61850 标准的内涵和特点，了解了电子式互感器、合并单元、智能断路器等装置的实现原理，分析了数字化变电站过程层的通信原理和构成方案；

②比较了在 MATLAB 基础上同时实现实时数字仿真及实时以太网通信的各种方法的优缺点，介绍了利用 Simulink 及其 xPC 组件组建合并单元、智能断路器和保护等装置的仿真模块的方法，开发出了能对数字化保护装置进行测试的实时闭环数字仿真系统；

③为实现装置测试的便利和流程化，在上述实时仿真系统的基础上开发了数字继电保护测试系统，包括典型的测试系统的建立过程、基于 MFC 及 MATLAB 引擎的图形用户界面的开发过程和使用本测试系统进行数字继电保护装置测试的流程。

④利用所建立的简单继电保护装置的仿真模型，验证了所开发的测试系统的功能和性能。通过对仿真模型各组成部件的通信实验和整个系统的集成测试，验证了本测试系统能够满足数字化保护的测试要求，达到了课题的预期目标。

第二章 数字化变电站技术介绍

2.1 概述

数字化变电站概念的提出是基于光电技术、微电子技术、信息技术、网络通信技术的发展, 在应用方面直接表现为变电站二次系统的信息应用模式发生巨大的变化。因此, 从某种意义上讲“数字化变电站”主要指变电站二次系统“数字化”, 其内涵体现为以下几个方面^[2,3]:

- 1) 反映电网运行情况的电气量信息实现数字化输出;
- 2) IED 对于电力系统的信息实现统一建模;
- 3) IED 之间信息交互以网络通信方式实现;
- 4) 运行控制操作过程通过网络通信方式以信息报文形式实现。

可以看出, 数字化变电站技术意味着变电站自动化领域的一场革命, 不仅变电站内的监控、远动、继电保护、安全自动装置等设备的可靠性、实时性、经济性将得到迅速提高, 而且基于数字化变电站所提供的更为丰富的电网信息, 整个电网的运行与控制都具备了实现重大技术突破的可能。

实现基于 IEC 61850 标准的统一信息建模, 采用低功率、紧凑型、数字化的新型电流和电压互感器代替常规 TA 和 TV, 将高电压、大电流直接变换为低电平信号或数字信号, 利用高速以太网构成数据采集及传输系统, 并采用智能断路器控制等技术, 这构成了数字化变电站的技术支撑体系。

2.2 IEC 61850 标准简介

IEC61850 是国际电工委员会 (IEC) 第 57 技术委员会 (TC57) 制定的关于变电站自动化系统通信网络和系统的标准。制定标准目的是为了实现不同厂商之间的设备的互操作性。IEC61850 标准借用了现代软件工程的思路和方法, 系统地分析了现代变电站自动化系统的通信需求以及技术背景, 进而对变电站内的通信网络和系统进行了抽象设计, 然后映射到了基于以太网的协议栈进行具体实现, 并在最后给出了协议一致性测试方法; 与此同时, 标准也关注了变电站自动化系统项目质量管理以及环境、电磁兼容性等方面的一般需求; 总的说来, IEC 61850 是变电站自动化专业涉及面广泛、设计较为完备的的最新国际标准^[31]。

IEC 61850 是迄今为止最为完善的关于变电站自动化的通信标准，也是 TC57 近年来发布的最重要的一个国际标准，其制订的出发点是实现“同一世界，同一技术，同一标准”的理想目标^[32]。

2.2.1 IEC 61850 的基本内容

IEC 61850 标准共由 10 部分组成，各个部分的名称和内容如下^[25]：

1. IEC 61850-1: 介绍和概论

介绍了标准的适用范围和目的，定义了变电站内 IED 之间的通信和相关系统要求，并论述了制定一个适用标准的途径和如何对待通信技术革新等问题。

2. IEC 61850-2: 术语

给出了 IEC 61850 文档中涉及的关于变电站自动化系统特定术语及其定义。

3. IEC 61850-3: 总体要求

详细说明系统通信网络的总体要求，重点是质量要求，还涉及了环境条件和供电要求的指导方针，并根据其它标准和规范对相关的特定要求提出了建议。

4. IEC 61850-4: 系统和项目管理

描述了对系统和项目管理过程的要求以及对工程和试验所需的专用工具的要求。主要包括：工程要求，系统寿命周期，质量保证三个方面。

5. IEC 61850-5: 功能和设备模型的通信要求

规范了变电站自动化系统所完成功能的通信要求和装置模型。主要包括：基本要求、逻辑节点的分析、逻辑通信链路、通信信息片的概念、逻辑节点和相关的通信信息片、性能、功能等方面的要求。

6. IEC 61850-6: 变电站自动化系统结构语言

规定了描述系统工程的过程、与通信有关的 IED 配置和参数、通信系统配置、开关间隔结构以及它们之间关系的文件格式。

7. IEC 61850-7: 变电站和馈线设备的基本通信结构

① 7-1: 原理和模型，提供了基本建模和描述方法的有关信息，解释了 IEC 61850-7-2, 7-3, 7-4 和 IEC 61850 之间的详细要求，以及 IEC 61850-8-1 和 9-1、9-2 中具体的通信协议。

② 7-2: 抽象通信服务接口 (ACSI, Abstract Communication Service Interface)，从三个方面对抽象通信服务接口进行了描述，包括抽象通信服务接口的描述、抽象通信服务的规范、设备数据库结构的模型。

③ 7-3: 公用数据类, 定义了和变电站应用有关的公共属性和公共数据类。

④ 7-4: 兼容的逻辑节点类和数据类, 规定了 IED 之间通信的兼容逻辑节点名称和可能包含的所有数据名称。

8. IEC 61850-8: 特定通信服务映射 (SCSM, Specific Communication Service Mapping) ——映射到制造报文规范 (MMS), 说明了在局域网上交换数据的方法, 将 ACSE 映射到 MMS 的服务和协议, 用于变电站层和间隔层以及变电站层与间隔层之间的通信映射。

9. IEC 61850-9: 特定通信服务映射 (SCSM)

① 9-1: 通过单向多路点对点串行通信链路的采样值, 定义了电子式互感器通过合并单元与具有数字接口的间隔层保护、测控装置之间的点对点通信方法。

② 9-2: 通过 IEC/ISO 8802-3 的采样值, 定义了局域网过程总线上完成电子式互感器、合并单元、保护装置、间隔测控装置之间的采样值传输方法。

10. IEC 61850-10: 一致性测试

包含了一致性测试规则、质量保证和测试、一致性测试所需要的文件、有关设备的一致性测试及测试手段、测试设备的要求和有效性证明。

通过分析以上的内容, 可以看出: 与以往的通信协议不同, IEC 61850 不仅定义了变电站自动化系统的通信要求和数据交换, 还对整个系统的对象模型、通信网络结构、项目管理控制和测试方法进行了全面的描述和规范。

2.2.2 IEC 61850 的核心技术特点

IEC 61850 系列标准应用了最新通信和信息技术的全新设计, 其关键技术特点表现在以下几个方面:

(1) 信息分层分布式体系结构^[33]

IEC 61850 标准提出了变电站内信息分层的概念, 无论从逻辑概念上还是从物理概念上, 都将变电站的通信体系分为变电站层、间隔层和过程层三个层次, 并且定义了层和层之间的逻辑接口。其中: 过程层主要完成开关量 I/O、模拟量采样和控制命令的发送等与一次设备相关的功能; 间隔层的功能是利用本间隔的数据对本间隔的一次设备产生作用; 变电站层的功能则分为两类: 一是与过程相关的功能, 主要指利用各个间隔或全站的信息对多个间隔或全站的一次设备发生作用。二是与接口相关的功能, 主要指与远方控制中心、工程师站及人机界面的通信。

(2) 面向对象的信息建模技术

与以往的通信协议采用面向点的信息描述方式不同, IEC 61850 标准的一个显著特征是采用面向对象的方法来描述变电站及其设备信息。首先, 定义若干语义模型类, 对照语义模型类, 将 IED 的自动化功能和相关信息抽象、分解, 并通过对语义模型类的继承、重载或直接引用, 生成特定的应用实例。最后, 将这些实例按照“类”的形式层次化的构成具有一致性和确定性的信息模型(即服务器)。信息模型的属性通常包含逻辑设备、逻辑节点、数据对象和数据属性 4 个层次。

(3) 抽象通信服务接口 ACSI 和特殊通信服务映射 SCSM 技术

IEC 61850 标准中提出了抽象通信服务接口(ACSI)技术。它独立于具体的网络应用层协议, 与采用的网络无关, 具有后向兼容性。ACSI 通过采用抽象的建模技术, 为变电站设备定义了公共应用服务, 从而提供了通过虚拟镜像访问真实数据和真实设备的途径。ACSI 和 SCSM 技术的应用, 解决了标准的稳定性与未来网络技术发展之间的矛盾, 随着新的网络技术在变电站自动化系统中的运用, 只要对 SCSM 进行相应的改动, 而不需要修改 ACSI。

(4) 自我描述的变电站配置语言^[34]

IEC 61850 定义了基于可扩展标记语言(XML)的 SCL 语言, 用来描述变电站自动化系统及其设备的配置与功能信息。作为变电站自动化系统的专用语言, 语法上 SCL 遵循 XML 语法规则, 生成的是标准的 XML 文件, 具有 XML 语言自我描述的特点; 语义上 SCL 遵循 IEC 61850 定义的语义规范, 通过面向对象的思想可以准确和完整的描述出变电站自动化系统的全部信息, 实现了自我描述。配置语言的自我描述是实现智能电子设备之间互操作的基础。

2.3 数字化变电站过程层设备

2.3.1 电子式互感器

1. 电子式互感器的实现原理^[2,35-40]

电子式互感器(Electronic Transducer)是由连接一次系统和二次转换器的一个或多个电流或电压传感器组成, 用于传输正比于被测量的量, 提供给测量控制、和保护装置。根据其高压侧是否需要供电, 电子式互感器可以分为有源型和无源型两类。前者是在传感头部分用 Rogowski 线圈或低功率的电磁感应式 CT 获取被测电流信息, 用分压器获取被测电压; 后者则是利用光学原理传感头对电流、电压进行测量, 并利用现代电子技术进行信号处理。

(1) 有源型电子式互感器

有源型电子式互感器的工作原理是：一次侧的采样传感器对电压、电流信号进行取样，并利用有源器件调制技术，把电信号转换成为光信号；然后以光纤作为传输通道，把转换后的光信号传送到低压侧进行信号处理，还原后得到被测点信号。在上述过程中，处于高压环境中的一次侧电子电路需要电源供电才能正常工作，这个电源要求非常可靠，利用激光供电是目前普遍采用的供电方法，由此引出的高压条件下的电源绝缘问题也是需要解决的关键问题之一。

当前，基于 Rogowski 线圈的有源型电子式电流互感器因其功率输出低、结构简单、线性度良好、被测电流几乎不受限制、反应速度快，在电力系统中得到越来越广泛地应用；有源型电子式电压互感器则多采用精密电容分压器作为取样元件，在气体绝缘的母线外围布置电极，构成柱状同轴电容器。将其作为分压器的高压臂，可以得到足够的测量精度。

(2) 无源型电子式互感器

无源型电子式互感器，又称光电式电压/电流互感器，其高压侧采用光学传感头，高压侧与低压侧之间没有电气连接，因此具有优良的绝缘特性。根据传感原理，无源型电子式互感器又可以分为两类：

① 利用电场或磁场的间接光效应调制

电流测量采用磁致伸缩效应、电压测量采用压电效应来改变晶体的物理尺寸或形状。晶体物理尺寸或形状的改变被传感头感应后，变换为信号经光纤传输到低压侧。

② 采用电场或磁场的直接光效应调制

电流测量采用法拉第 (Faraday) 磁光效应，即线偏振光的偏振方向在磁场中发生旋转的效应；电压测量采用普克尔 (Pockels) 电光效应，即晶体的折射率在电场的作用下发生变化的效应。

目前，在无源型电子式电流互感器方面，基于磁伸缩效应原理的电流互感器由于种种原因，工业化应用进展缓慢。而利用法拉第效应的电流测量方法较为直接，且装置简单、精度高，是最有发展潜力的无源型电子式电流互感器；在无源型电子式电压互感器方面，不论是采用电光晶体还是压电晶体作电压传感头，其原理都是根据晶体在外加电场作用下产生的电极化效应来实现电压的测量，因而工作性能不够稳定。

(3) 两类互感器的比较

有源型电子式互感器由于利用光纤系统提供激光电源, 具有绝缘性高、抗电磁干扰强等优点, 显著降低了互感器的制造成本, 减少了体积和重量, 充分发挥了被电力工业界广泛接受的常规测量装置的优势; 同时避免了无源型电子式互感器传感头光路复杂, 以及受温度、外界振动影响较大的技术难点。因此在实用化道路上走在了无源型电子式互感器的前面。

2. 电子式互感器的输出要求^[35,40]

相关标准对电子式互感器数字输出作了相关的要求, 包括数字输出的额定标准值和所采用的通信接口技术。其中, 保护用电流互感器为 16 进制 01CF H (10 进制 463), 测量用电流互感器和保护/测量用电压互感器的数字输出额定标准值为 16 进制 2D41 H (10 进制为 11585)。前者可测电流/电压范围达到额定一次值的 50 倍 (0%偏移) 或 20 倍 (100%偏移) 而无溢出, 后者可测电流/电压范围达到额定一次值的两倍而无溢出。

2.3.2 合并单元

合并单元 (MU, Merging Unit) 是针对数字化输出的电子式互感器而设计的, 也是数字化输出接口的重要组成部分, IEC 60044-8 和 IEC 61850-9 中均对其进行了规范。它的主要任务是同步采集电子式互感器输出的电流和电压数字量信息, 经过组帧处理后, 按照一定的通信方式输送给二次保护和控制设备。目前, 合并单元与二次侧的保护、测量设备之间大多遵循 IEC 61850-9-1 标准的规定, 采用光纤以太网进行通信, 发送采样值报文^[41,43]。

合并单元所要完成的功能可以划分为三方面: 同步功能、多路数据采集和处理功能、数据发送功能。按照功能划分的合并单元模型如图 2-3 所示。下面简要介绍这三个功能模块^[44,45]。

(1) 同步功能模块

通常, 变电站采用 GPS 来对信号进行同步, 因为它能够将精度提高到小于 4 μ s。同步功能模块功能包括两部分: 一是正确识别 GPS 接收机输出的同步秒脉冲 (1PPS), 二是根据合并单元的额定采样频率给各路 A/D 转换器发送同步转换信号, 实现同步采样。

(2) 数据采集和处理功能模块

这是与电子式互感器进行接口的主要功能模块。在合并单元给多路 A/D 转换

器发送同步转换信号后,将同时接收 12 路通道的输出数据并对其有效性进行校验,常采用循环冗余校验 (CRC) 对各路 A/D 输出的数据进行检验。此外,合并单元还需对这些数据进行正确排序并输出给通信功能模块。

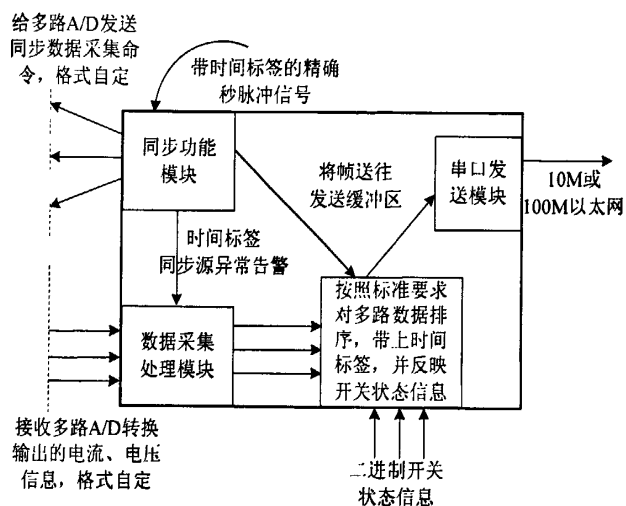


图 2-1 合并单元功能模型

(3) 通信功能模块

该模块将各路采样值数据进行组帧并发送给保护、测量设备。此功能体现了 IEC 60044-7/8 和 IEC 61850-9-1/9-2 中合并单元功能实现的主要区别。前者是基于 FT3 格式的曼彻斯特编码发送,传输速率为 2.5Mbps。由于传输速率比较慢,限制了采样率,不适用于对采样率要求较高的计量、差动保护等装置;后者是基于 IEEE 8802-2 和 ISO/IEC 8802-3 标准,即采用以太网的方式进行发送,速度可达 100Mbps 甚至更高,目前该方式被广泛采用。

2.3.3 智能断路器装置

IEC 62063 标准将智能断路器设备定义为:“具有较高性能的断路器和控制设备,配有电子设备、传感器和执行器,不仅具有断路器的基本功能,还具有附加功能,尤其在监测和诊断方面”。智能断路器的实现目标是:电子操动、电容储能、电机直驱动作;具有数字化的接口,能够接收和发送符合 IEC 61850 标准的通信报文,分合闸命令、位置信息、状态信息均通过以太网传输。

智能断路器在现有断路器的基础上引入了智能控制单元,它由数据采集、智能识别和调节装置 3 个基本模块构成。工作原理见图 2-2,图中实线部分为现有断路器和变电站的有关结构和相互关联。智能识别模块是智能控制单元的核心,由微处理器构成的微机控制系统,能根据操作前所采集到的电网信息和主控制室发

出的操作信号，自动地识别当次操作时断路器所处的电网工作状态，根据对断路器仿真分析的结果决定出合适的分合闸运动特性，并对执行机构发出调节信息，待调节完成后再发出分合闸信号；数据采集模块主要由新型传感器组成，随时把电网的数据以数字信号的形式提供给智能识别模块，以进行处理分析；执行机构由能接收定量控制信息的部件和驱动执行器组成，用来调整操动机构的参数，以便改变每次操作时的运动特性。此外，还可根据需要加装显示模块、通信模块以及各种检测模块，以扩大智能操作断路器的智能化功能。智能断路器基本工作模式是根据监测到的不同故障电流，自动选择操作机构及灭弧室预先设定的工作条件，如正常运行电流较小时以较低速度分闸，系统短路电流较大时以较高速度分闸，以获得电气和机械性能上的最佳分闸效果^[2]。

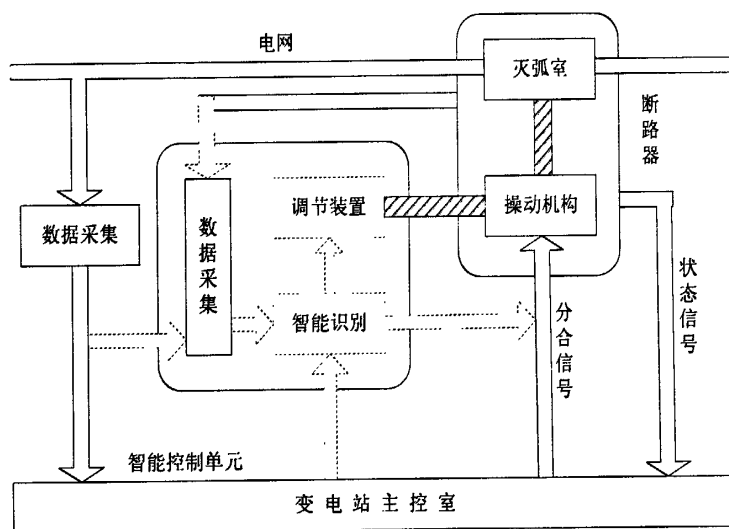


图 2-2 智能断路器工作原理

由此可见，在数字化变电站中，断路器的跳闸控制方式发生了根本性的变化，控制回路中电子电路的寿命和可靠性成为智能断路器技术推广应用的关键。诸多断路器制造商在该产品的研发上极为慎重，智能断路器仍处于试验研究阶段。为了配合数字化变电站技术的推广，作为智能断路器技术的补充，断路器智能控制装置得到了相应的发展和应用。断路器智能控制装置作为一次设备的代理装置，将原控制室内的操作控制回路下放到就地开关站，与一次设备之间采用硬接线连接，与二次设备通过光纤相连。智能控制装置与间隔层保护、测控装置之间通过面向通用对象的变电站事件（GOOSE）实时传送信号量。间隔层保护装置以及测控装置的跳合闸命令，按不同的 GOOSE 优先级传送到智能开关单元，由智能控制装置通过硬接线输出到一次设备，具有与智能断路器等同的通信和操作功能。

2.4 数字化变电站过程层通信

IEC 61850 定义的抽象通信服务接口 (ACSI) 主要由两种通信机制组成: 客户/服务器模式和发布者/订阅者模式。前者针对控制、读写数据值等功能服务, 主要应用于变电站层和间隔层设备之间的通信; 后者针对快速和可靠的数据传输服务, 主要应用于过程层与间隔层之间的通信。针对采样测量值和跳闸命令这两类过程层通信中最为重要的信息, IEC 61850 标准定义了两种抽象模型: 采样值传输 (SAV) 模型和面向通用对象的变电站事件 (GOOSE) 模型。其中 SAV 模型应用于采样值传输及相关服务, 而 GOOSE 模型则提供了变电站事件 (如命令、告警等) 快速传输的机制, 可用于跳闸和故障录波启动等。这两种通信模式均基于发布者/订阅者通信结构。^[44,50]

2.4.1 发布者/订阅者通信结构

现代通信技术主要有 3 种通信中间件结构: 点对点、客户/服务器和发布者/订阅者。发布者/订阅者通信结构在复杂的分布式系统中应用广泛, 它可在各通信节点之间形成点对多点的直接通信, 是一个或多个数据源 (即发布者) 向多个接收者 (即订阅者) 发送数据的最佳解决方案。如图 2-3 所示, 采样值和跳闸命令传输的通信过程均由发布者的控制模块进行控制, 发布者和订阅者之间实现报文传输 (SendMessage)、控制值设置 (SetControlValue) 和数据值获取 (GetDataValue) 等服务, 其中报文传输是高实时性的服务。

缓冲型工作方式是发布者/订阅者模式实现快速、可靠的报文传输服务的基础, 它只将最近发布的数据保留在网络缓冲区内, 并且完全覆盖先前的数据。其中 SAV 模型发送缓冲区的数据集内容主要是电流、电压值信息, 而 GOOSE 模型并未强制所传输的信息内容, 缓冲区的数据集内容可由用户灵活定义。

由于两类报文的传输驱动方式完全不同, IEC 61850 标准中定义了相应的控制参数来满足各自的要求。采样值传输是一种时间驱动的数据通信方式, 通信频率一定, 当由于通信网络不畅导致报文传输丢失时, 并不重发; 跳闸命令传输是事件驱动的数据通信方式, 发布者由事件触发后, 从数据集中收集所需数据并通过发送缓冲区发送出去, 它具有异步传输和随机性的特点。由于跳闸命令传输要求的实时性和可靠性更高, GOOSE 传输采用较高的报文优先级和可靠的重发机制, 如图 2-4 所示^[51]。

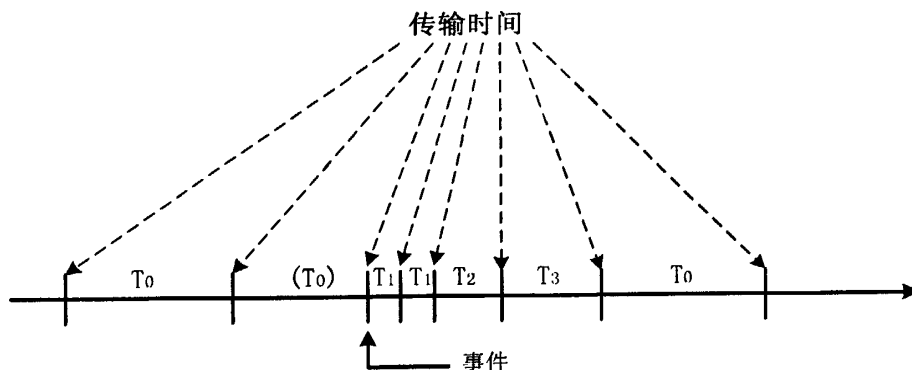
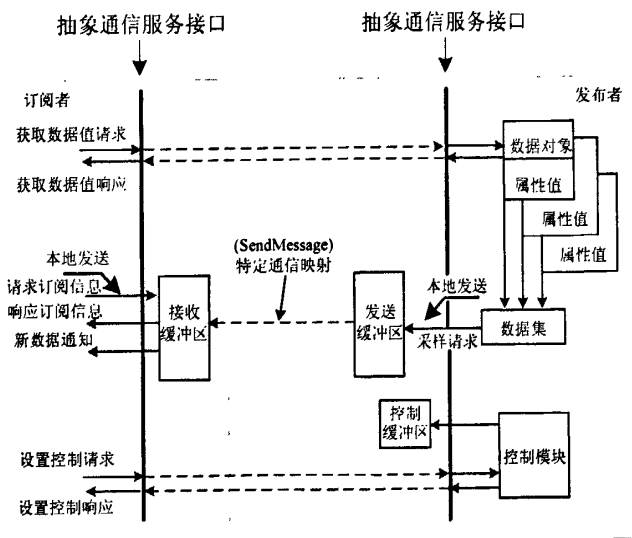


图 2-4 GOOSE 发送机制示意图

2.4.2 报文传输实现机制

由于抽象信息模型不依赖于具体的通信协议栈，为了实现具体的应用进程之间的通信，IEC 61850 采用了特定通信服务映射（SCSM）的方法，将当前已经成熟的、流行的国际通信标准作为 IEC 61850 的通信协议栈，其映射一般遵循 MM S+TCP/IP+ISO/IEC8802.3 的映射模式。而考虑到 SAV 和 GOOSE 报文传输的高实时性要求，为了避免在通信堆栈造成延时，SCSM 在应用层专门定义了协议数据单元（PDU），经过表示层编码后，不经 TCP/IP 协议，直接映射到数据链路层和物理层，传输层和网络层均空，从而保证了报文传输的快速性。

(1) SAV 报文^[27,47]

IEC 61850 标准在 9-1 和 9-2 部分定义了两种用于采样值报文传输的特定通信

服务协议。

① 应用层：IEC 61850-9-1 描述的交换信息是通过应用服务数据单元 (ASDU) 实现的。它遵循了 IEC 60044-7/8 标准对合并单元的定义，主要包含 12 路电流、电压信息和反映各路信息有效性的状态信息。SAV 报文的 APDU 有两个应用服务数据单元组成，其中通用数据集由与 IEC 60044-7/8 标准相同的基本数据集构成，状态数据集由 IEC 61850 定义的用来指示节点状态的二进制状态数据集构成。

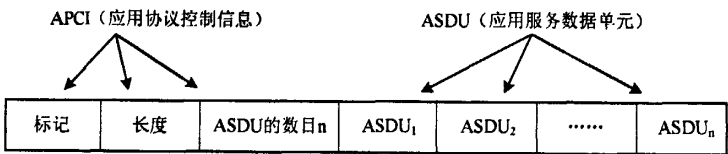


图 2-5 采样值报文的 APDU (应用协议数据单元) 格式

IEC 61850-9-2 定义的采样值报文仍然采用 APDU 的组织形式，如图 2-5 所示，但其数据集的内容可以自由定义，增加了灵活性。

② 表示层：ASN.1 是一种抽象语法，它通过定义若干个简单类型和由简单类型复合成的构造类型，在表示层用一致的形式来表示应用层复杂多样的数据，以实现不同系统之间的通信。采样值报文和 GOOSE 报文均采用 ASN.1 的 BER (基本编码规则) 对应用层的数据进行编码，以便在以太网上进行传输，编码格式为 TLV，如图 2-6 所示，由标签、长度和值组成。其中，TAG 用于标识标记或值的类型，长度用于表示 VALUE 字段的长度；VALUE 用于标识数据元素的值。

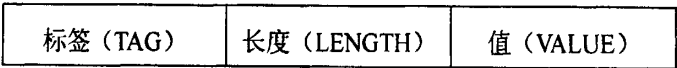


图 2-6 ASN.1 基本编码格式

IEC 61850-9-1 的 APDU 采用了简化的 ASN.1 编码方式，如图 2-7 所示，各项信息内容如控制块标识 (MsvID)、采样值、采样计数器等都被视为同一种类型 (OCTET STRING) 进行编码，编码为八位字节串；9-2 中规定对采样值报文的编码严格按照上述 BER 编码格式进行编码。

③ 数据链路层：IEC 61850-9-1 规定的 SAV 报文封装成 1 帧长度固定为 111 字节 (包括 FCS 和帧前同步信号) 的以太网帧，如图 2-7 所示。

ASDU 基本数据集长度为 44 字节，主要包括 ASDU 报头、逻辑节点名、数据集名、逻辑设备名、电流/电压额定值、12 路通道的采样值、状态字、采样计数器及采样频率等。其中额定值和采样值为 16 位整数；状态字标记发布者的工作状态，包括是否需要维护、采样同步方式以及各通道采样值是否有效；采样计数器用来

对 SAV 报文的发送次数进行计数，用于报文辨识与同步；采样频率则用来标记额定频率下每周期应发送 SAV 报文的数目。ASDU 状态数据集长度为 21 字节，结构与基本数据集相似，但内容是 16 个带品质因数的二进制状态信息，用于反映合并单元扩展 I/O 的节点状态信息。



图 2-7 IEC 61850-9-1 定义 SAV 报文的以太网帧格式

IEC 61850-9-1 还对以太网帧的其他方面作了规定，其中：SAV 报文的广播地址规定为 FF-FF-FF-FF-FF-FF，组播地址规定为 01-0C-CD-04-00-00 至 01-0C-CD-04-01-FF；优先级标记为 0x8100，优先级缺省为 4；以太网型式 PDU 中的以太网型式为 0x88BA。

9-2 部分规定的组播地址，优先级，以太网型式等数据链路层相关设置同 9-1 部分一样。SAV 报文也采用以太网帧的格式封装，APDU 的组织格式与 9-1 定义的大体相同，但 ASDU 数目和内容不定，报文长度不定。

通过前面对 IEC 61850-9-1 和 9-2 定义的 SAV 报文的分析，我们可以知道：9-1 规定的帧格式固定，不允许改变，采用广播或组播的方法，对于 IEC 61850-7-2 定义的采样值 ASCII 模型的服务，它只支持 SendMSVMessage 服务，不支持 GetMSVCBValues、SetMSVCBValues 等控制服务，也不支持对数据对象的直接访问等服务。因此 9-1 的映射方法相对固定、简单，是对 ASCII 模型的简化；9-2 部

分支持采样值 ASCII 模型的全部服务,除了支持直接映射到数据链路层的 SendMSVMessage 服务外,还支持向 MMS 的映射,通过 GetMSVCBValues、SetMSVCBValues 等控制服务可在线修改采样值服务的参数,如输入通道数、采样频率等参数,支持对数据集的更改和对数据对象的直接访问,帧格式可灵活定义,并支持单播方式。因此 9-2 的映射方法更为灵活,对 ACSI 模型的支持也更加完备。

尽管 9-1 与 9-2 存在上述的区别,但 IEC 61850 标准的制定完全考虑了二者的兼容,将来遵循 9-1 标准的设备可以很方便地过渡融合到 9-2 标准所定义的过程总线通信网络上^[48]。

(2) GOOSE 报文

① 应用层:GOOSE 报文采用协议数据单元(PDU)的组织格式,IEC 61850-8-1 中给出了基于 ASN.1 语言的格式规范,如下所示^[49,50]:

```
IEC 61850 DEFINITIONS ::= BEGIN
IMPORTS Data FROM ISO-IEC-9506-2
IEC 61850-8-1 Specific Protocol ::= CHOICE {
    gseMngtPdu          [APPLICATION 0]  IMPLICIT GSEMngtPdu,
    goosePdu            [APPLICATION 1]  IMPLICIT IECGoosePdu,
    ..... }
IECGoosePdu ::= SEQUENCE {
    gocbRef              [0]    IMPLICIT VISIBLE-STRING,
    timeAllowedtoLive    [1]    IMPLICIT INTEGER,
    .....
    allData              [11]   IMPLICIT SEQUENCE OF Data,
    security              [12]   ANY OPTIONAL,
    .....
    }
END
```

此抽象表述格式定义中,DEFINITIONS, IMPORTS, CHOICE, IMPLICIT 和 SEQUENCE 等均为 ASN.1 的专用术语。其中:DEFINITIONS 说明了本数据结构的模块名称是 IEC 61850;IMPORTS 构件指出此模块引用了 ISO/IEC 9506-2(MMS) 中定义的 Data 参数,这从 IECGoosePdu 定义的元素 allData 中也能得到印证;CHOICE 类型表示从一组值中选择某个变量,针对 GOOSE 报文传输,需选择变量 goosePdu,其标志名称是 IECGoosePdu;IECGoosePdu 的格式由 13 个元素序列组成,分别是 gocbRef、timeAllowedtoLive 等,这 13 个元素所代表的信息是 GOOSE

报文的主要内容。

② 表示层：严格按照 ASN.1 的 BER（基本编码规则）对应用层的 PDU 进行编码。

③ 数据链路层：GOOSE 报文同样采用以太网帧的封装格式，其广播地址为 FF-FF-FF-FF-FF-FF，组播地址为 01-0C-CD-01-00-00 至 01-0C-CD-01-01-FF；优先级标记为 0x8100，优先级缺省为 4；以太网型式 PDU 中的以太网型式为 0x88B8。

2.4.3 数字化变电站过程层构成方案

数字化变电站过程层主要由常规的互感器和断路器、电子式互感器和合并单元、智能断路器构成。目前，对于数字化变电站过程层的构成主要有三种基本模式：①常规互感器和常规断路器；②电子式互感器和常规断路器；③电子式互感器和智能断路器^[2]。

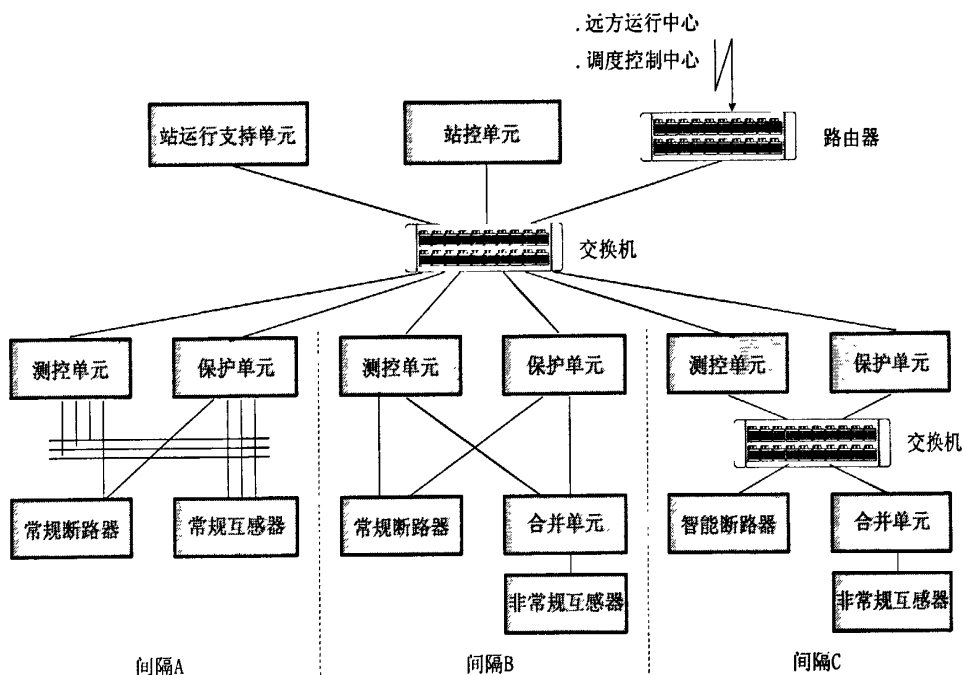


图 2-8 过程层构成方案

1) 方案一：过程层采用常规互感器和断路器，如图 2-8 中间隔 A，间隔 A 只使用了变电站总线，采用传统的连接导线方式实现保护装置和监控单元信息交互，即采用点对点的硬接线联结方式接入常规互感器和断路器。

2) 方案二：过程层采用电子式互感器和常规断路器，如图 2-8 中间隔 B，间隔 B 没有过程总线，但使用了合并单元，模拟量采样基于 IEC 61850-9-1 单向多路点对点串行通信连接方式。

3) 方案三: 过程层采用电子式互感器和智能断路器(或智能断路器控制器), 如图 2-8 中间隔 C, 间隔 C 采用了过程总线, 通过合并单元将常规互感器模拟量以多播方式(IEC 61850-9-2)发布到过程总线。间隔层设备与智能断路器通过过程总线组成 GOOSE 网络。GOOSE 网络与采样值网络目前应用中为满足可靠性是分开, 未来可以考虑共用一条过程总线。

2.5 本章小结

电子式/光电式互感器、IEC61850 标准、高速以太网和智能一次设备构成了数字化变电站的技术支撑体系。这一支撑体系同时也为数字继电保护测试技术提出了技术需求和性能要求。本章在简要介绍变电站智能一次设备和 IEC61850 标准的基础上, 详细介绍了数字化变电站过程层通信的实现机制, 包括通讯结构、报文传输机制和过程层构成方案等内容。

第三章 实时数字仿真系统的建立

研究如何在常用非实时仿真软件的基础上实现实时数字仿真和以太网通信,从而满足数字保护的测试要求,具有良好的经济性和实用价值。

MATLAB是由美国的Mathworks公司自1984年开始推出的一个为科学和工程计算而专门设计的高级交互式软件包,它是一种高性能的用于工程计算的编程软件,可以实现工程计算、算法研究、建模和仿真、数据分析及可视化、科学和工程绘图、应用程序开发(包括图形用户界面设计)等功能。MATLAB具有如下的优势与特点:

- 友好的工作平台和编程环境
- 简单易用的程序语言
- 强大的科学计算及数据处理能力
- 方便的数据可视化功能和出色的图形处理功能
- 应用广泛的模块集和工具箱
- 实用的程序接口和发布平台
- 模块化的设计和系统级的仿真

Simulink是MATLAB中强大的动态仿真工具,它具有构造模型简单、实现系统控制容易、便于修改参数、界面友好、功能强大等优点,成为动态系统建模与仿真方面应用最广泛的软件包之一。MATLAB/Simulink已广泛应用于电力系统的仿真研究^[52,53]。

本章主要讲述如何在MATLAB/Simulink的基础上实现实时数字仿真和以太网通信的解决方案。

3.1 MATLAB 实时仿真方法的选择

3.1.1 Simulink 仿真介绍

Simulink是MATLAB最重要的组件之一,它提供一个动态系统建模、仿真和综合分析的集成环境。在该环境中,无需大量书写程序,而只需要通过简单直观的鼠标操作,就可构造出复杂的系统。Simulink具有适应面广、结构和流程清晰及仿真精细、贴近实际、效率高、灵活等优点,已被广泛应用于线性系统、非线性系统、数字控制及数字信号处理的建模和仿真中。同时有大量的第三方软件和硬件

可应用于或被要求应用于Simulink。

Simulink是MATLAB中的一种可视化仿真工具,是一种基于MATLAB的框图设计环境,为了创建动态系统模型,Simulink提供了一个建立模型方块图的图形用户接口(GUI),这个创建过程只需单击和拖动鼠标操作就能完成。Simulink可以用连续采样时间、离散采样时间或两种混合的采样时间进行建模,它也支持多速率系统,也就是系统中的不同部分具有不同的采样速率。模型图创建完成后,选择所需的模型求解方法并设定求解步长,然后即可运行仿真,仿真过程中及仿真完成后用户都可以通过多种手段直观的察看仿真结果。

Simulink包含广泛的用于对系统建模的模块库,包括基本模块库和附加模块库。基本模块库中包含建模所需的基本模块:连续和离散动态模块,如Integration和Unit Delay;算法模块,如Sum, Product, Lookup Table;信号结构模块,如 Mux, Switch, Bus Selector 等。附加模块库扩展了Simulink的特殊应用功能,包括对航空航天、通讯、信号处理、电力等领域的应用,如Simscape、 SimDriveline、 SimHydraulics、 SimMechanics、 SimPowerSystems等附加模块库。SimPowerSystems是电力系统模块库,包含了电力工业仿真建模所需的电源模型、电路元件模型、电力电子设备模型、电机模型、接线部分模型和测量设备模型等。利用基本模型库和SPS (SimPowerSystems)库中的模型可以搭建所需的电力系统模型,实现仿真^[54]。

3.1.2 Real-Time Workshop 简介

Real-TimeWorkshop (实时工作间)作为Simulink的一个重要功能模块,是一种可以在多平台上(包括Microsoft Windows、 Unix和DSP等)运行的产品,是一种实时开发环境,可以直接从Simulink的模型产生出可移植的程序源代码(C语言或Ada语言代码),并自动构造出能在多种环境中(包括实时系统和单机仿真)实时执行的程序。它为系统从设计到实现提供了一条快捷的途径。通过Real-Time Workshop可以在远程处理器上实时运行仿真模型,也可以在主机或外部计算机上运行高速单机仿真^[55]。

Real-Time Workshop具有以下这些主要特性:

- 1)能够从定步长的Simulink连续时间系统模型、离散时间系统模型和混合系统模型直接产生源代码。
- 2)产生的代码是经过优化的,从而保证了执行速度。
- 3)代码具有可移植性,能够在多种环境中使用,而且可读性强,便于维护。

- 4)自动构造程序,构造过程完全用户化。
- 5)使用可定制的make文件建立目标文件,并可以自动移植到硬件。
- 6)具有可扩充的支持多种硬件的驱动程序库,并支持第三方的硬件和工具。
- 7)从Simulink移植到外部硬件的参数可以在系统运行过程中进行在线调整。
- 8)自动函数内联,允许直接把函数嵌入到生成的代码中。从而可以消除函数调用的开销。

9)菜单驱动的良好图形用户界面使得操作更加简便。

基于Real-Time Workshop的这些特性,它主要用于以下几个方面:

1)实时控制:首先在MATLAB和Simulink下建立控制系统模型,然后通过Real-Time Workshop生成程序源代码,把源代码编译后可以直接移植到控制系统的硬件上。

2)实时信号处理:先用MATLAB和Simulink设计信号处理的算法,然后生成程序源代码,编译后移植到硬件上。

3)交互式实时参数调整:可以把Simulink作为实时模型的前端,这样就能够程序执行过程中调整参数。

4)实时仿真:比如模拟系统的训练、实时模型验证和测试。

5)高速单机仿真。

6)产生可移植的c语言代码。

3.1.3 实时仿真解决方案的选择

目前,将RTW应用于实时仿真的解决方案主要有以下三种方式^[56]:

1)利用RTW将模型文件生成c语言源代码,然后结合VC++等语言进行可视化仿真程序开发,在模型仿真过程中控制每一步的仿真时间,使仿真步长与真实时间一致,达到实时仿真的目的。

2)利用RTW提供的单机实时仿真环境,即Real-Time Windows Target来实现。Real-Time Windows Target允许在单机Windows系统上实时运行Simulink模型,并提供了多种硬件I/O接口驱动。用户可以通过Simulink来创建实时程序并可以控制该程序的执行。

3)利用RTW提供的双机实时仿真环境,即xPC Target来实现。xPC Target功能与Real-Time Windows Target一致,但是它在精简的实时内核上运行,不依靠操作系统,从而具有更高的仿真速度。

上述方案应用到电力系统仿真中各有利弊：方案一每次修改模型文件后需要重新生成移植源代码，而源代码的移植较为复杂，所以适用于模型文件不需要经常改动的情况下；方案二实时仿真形式简便易用，但由于它一般作为控制系统设计开发的验证工具，如果作为实际系统的最终解决方案可靠性不能满足要求，而且它不支持以太网通信所需的驱动程序，所以并不适于本课题的使用；方案三在航天、汽车等控制领域的硬件在回路仿真应用广泛，其仿真形式简便可靠并且支持高速以太网的通信方案，本课题予以采用，此方案唯一缺点是需要至少两台PC机（即主机和目标机）。以下将介绍方案三的具体实现。

3.2 xPC 实时仿真技术基础

3.2.1 xPC Target 实时仿真机制

xPC Target是一种高性能的主机-目标机结构原型环境(图3-1)，它能把Simulink模型和Stateflow模型和物理系统连接起来并且在低成本的PC硬件上实时运行。xPC Target提供了系统的快速控制原型和硬件在回路仿真完整的解决方案。利用xPC Target 可以在主机上设计模型，并用Real-Time Workshop和Stateflow Coder自动生成代码，最后下载到运行xPC Target实时内核的PC机上。用户可以使用32位或64位X86架构的电脑作为实时目标系统。软件运行在32位保护模式下。使用xPC Target Embedded Option，用户可以在独立目标机上开发实时嵌入式系统，用于生产、控制、信号处理、数据获取、标定和测试等场合。

xPC具有以下强大功能^[57]：

- 1) 在任何一台PC机上使用实时内核，运行来自Simulink和 Stateflow的模型，支持任何PC系统，例如TargetBox、PC/104、PC/104+、 CompactPCI、嵌入式PC机或其它任何兼容PC机。
- 2) 灵活的启动选项，包括CD，硬盘，网络和软盘。
- 3) 根据处理器的性能水平、模型规模和I/O复杂程度，采样率可达到50KHz。
- 4) 主机和目标机之间采用RS-232或者更快速的TCP/IP通信，用户可以通过MATLAB命令行或者主机的图形界面（GUI）、标准的网络浏览器或者目标机命令行可以进行实时的目标程序控制、参数调整、信号（数据）采集。
- 5) xPC提供各种设备驱动，包括ISA、PC/104、PCI、CompactPCI总线的各种IO板卡，其4.0版增加了对实时 RAW Ethernet 通信的支持，支持通过intel网卡的

实时以太网通信。

6) C和COM API让用户可以编程开发用户图形界面来获取或控制实时应用程序。

基于xPC Target实现实时仿真的步骤如下：

1) 建立Simulink结构框图。从Simulink模块库和xPC Target模块库中选取所需模块建立模型图，并进行参数设置。通过Simulink模块及其参数对话框定义与物理I/O板相对应的参数值（如通道数目、输入输出电压的范围和采样时间等），就可以直接访问设备驱动程序控制I/O设备，实现与I/O设备交互；

2) 在Normal模式下仿真,验证模型参数设置是否满足要求；

3) 设置仿真参数以及RTW参数，配置生成目标为xPC Target应用程序；

4) 选择RTW/Build，自动完成程序代码的编译、链接，生成目标应用程序；

5) 生成目标机启动光盘（或软盘），并用该光盘启动目标机，建立主机与目标机的通信连接后，下载目标应用程序到目标机；

6) 运用xPC Target的信号采集方式同目标应用程序进行交互式操作，如调整参数、实时地采集、记录和跟踪信号、显示和控制目标系统的状态等。

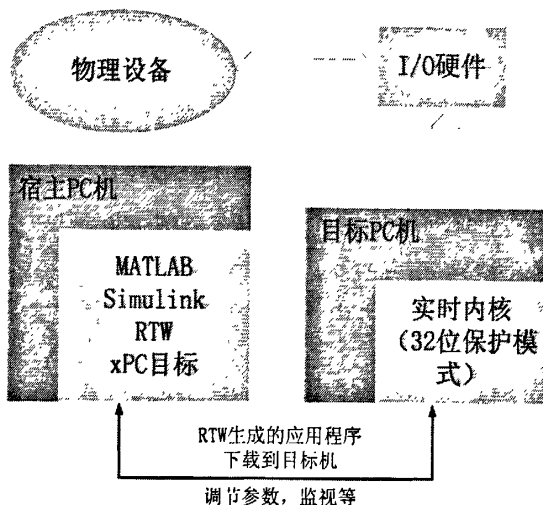


图 3-1 xPC Target 的双机模式

3.2.2 xPC Target 的实时以太网通信功能

xPC Target对实时以太网通信的支持是通过xPC Target模块库的Ethernet子库（图3-2）来实现的^[57]。从本子库中选取所需模块拖入模型图中，并设置相应模块参数，选择相应网卡驱动程序，实现模块与目标机物理网卡的对应。模型经编译下载到目标机后，目标机就可以成功与其他物理设备通过实时以太网通信。各模

块介绍如下:

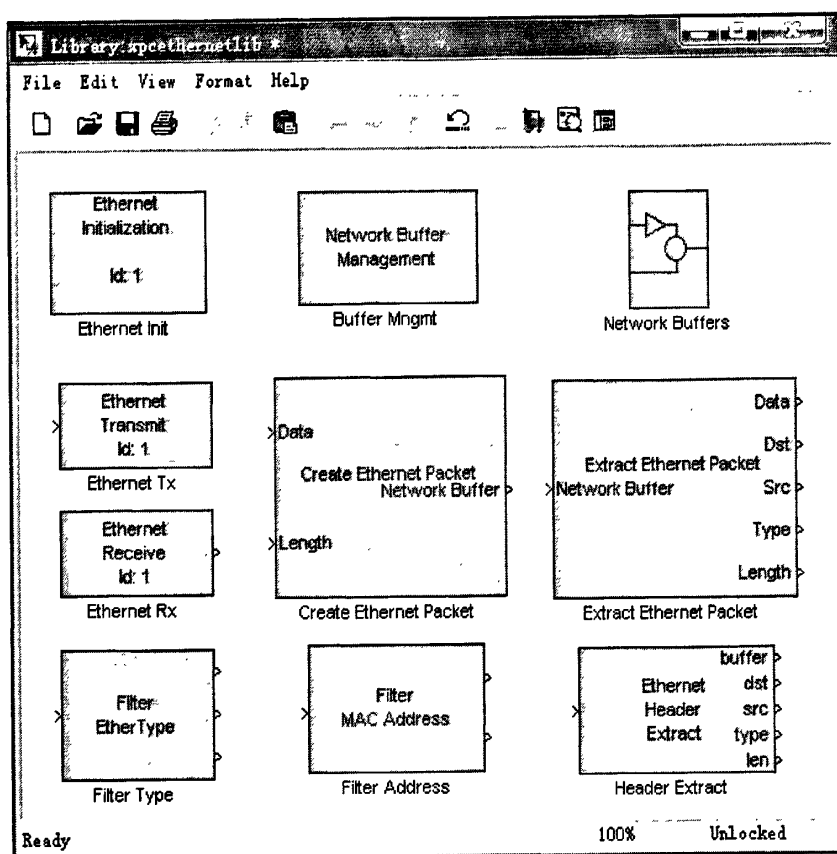


图 3-2 xPC Target 模块库的 Ethernet 子库

EthernetInit模块: 初始化以太网通信通道, 每个以太网卡对应一个EthernetInit模块。需要选择DeviceID,需要输入的参数有: PCI总线号、槽号和网卡MAC地址。PCI总线号、槽号可以在主从机建立连接后在MATLAB命令窗口输入getxpcpci('all')获得; MAC地址在IEC61850规定的范围内设定。

BufferMngmt模块: 初始化网络缓冲区, 可以设置缓冲区的大小, 一般使用默认设置即可。

CreateEthernetPacket模块: 构造以太网数据包, 需要输入的参数: 目的MAC可设为FFFFFFH广播地址, 也可以设为组播地址; 以太网类型根据IEC61850设为hex2dec('8100')。要发送的数据和对应的数据字节数作为输入, 输出的数据包交由EthernetTx模块发送。

ExtractEthernetPacket模块: 解析以太网数据包, 分离数据包头部分和数据部分, 需要输入的参数: Data size 分离出数据部分的长度(字节数)。

EthernetTx模块: 用来发送数据包, 参数: DeviceID选取相应网卡, 采样速率

默认-1, 表示继承输入模块采样速率。

EthernetRx模块: 用来接收数据包, 参数: DeviceID选取相应网卡, 采样速率默认-1, 表示继承输入模块采样速率。

Header Extract模块: 抽取报文头, 是组成ExtractEthernetPacket模块的一部分。

Fiter Type模块: 根据以太网类型, 过滤数据包。

Fiter Address模块: 根据MAC地址(原地址或目标地址), 过滤数据包。

3.2.3 xPC支持Simulink自定义模块

xPC作为Simulink的组件, 支持Simulink的自定义模块, 包括子系统和s函数自定义模块。子系统是将一组模块组合在一起构成单个的系统模块, 用以管理复杂模型。S函数自定义模块是指每个自定义模块对应一个s函数文件, 通过在S函数文件里面编写程序, 可以实现用户的自定义功能, 包括实现新算法、将已有的程序移植到模型中, 甚至实现与计算机硬件的交互等。S函数自定义模块支持大多数的编程语言, 如m语言、c语言、c++、FORTRAN、Ada等。

通过对子系统或s函数自定义模块进行封装, 这些自定义模块可以具有与基本模块类似的外形和参数设置对话框, 并且可以将它们加入到模块库中以备所需, 从而大大扩展了Simulink针对专业领域的仿真功能^[58]。

3.3 数字化变电站过程层实时数字仿真的实现

3.3.1 总体方案

所开发的数字化变电站过程层实时仿真系统的整体功能如图3-3所示, 主要包括电力系统暂态仿真和基于IEC 61850的通信功能。在MATLAB/Simulink/xPC的基础上建立本系统的方法分为以下几个方面:

1) 选取Simulink基本库模块和SimPowerSyetem库模块, 建立所要仿真电力系统网络模型。完成模块的连接和参数的设置等。

2) 光电互感器的数据采集功能由电力系统模块库的电压、电流测量单元来模拟。由于数字仿真采集到的信号已经是数字量, 所以互感器的A/D转换功能不必再进行仿真。

3) 合并单元(IEC 61850-9-1/9-2)功能由自定义的合并单元仿真模块实现。此仿真模块由Simulink基本模块、S函数模块和xPC以太网通信模块组合封装而成, 用以仿真合并单元的数据格式转换、数据组帧和数据包发送等功能。

4) 智能断路器模块由Simulink中断路器模块、S函数模块和xPC以太网通信模块组合封装而成, 实现智能断路器的GOOSE发送与接收功能, 并能根据GOOSE跳合闸信号操纵断路器的开合, 具有跳合闸逻辑判断功能。

5) 交换机是百兆或千兆以太网交换机, 最好具有报文优先级功能; 数字保护可以是实际装置, 也可以用另外的xPC目标机来仿真, 包括逻辑判断、采样值接收及GOOSE收发功能的仿真。

完成上述建模工作后, 遵照xPC双机仿真机制即可实现数字化变电站过程层的实时仿真并为数字保护的测试提供较为完善的测试环境。

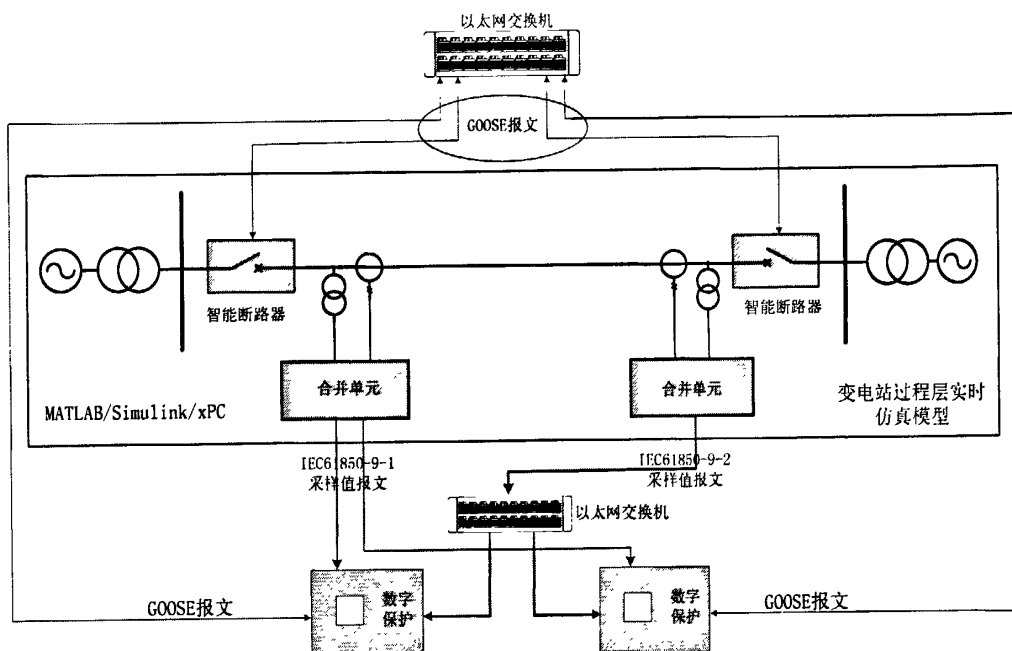


图 3-3 过程层实时仿真总体实现方案

3.3.2 合并单元模块的组建

合并单元的功能的仿真可以划分为两部分, 数据的组帧功能和数据帧的发送功能。数据帧的发送将利用xPC的实时以太网通信模块实现, 因此合并单元模块的组建工作主要在于数据组帧功能的实现。下面分别介绍基于IEC 61850-9-1和9-2的合并单元的建模方法。

(一) 符合IEC 61850-9-1的合并单元模型

本合并单元由自定义子系统模块实现, 其内部结构如图3-4, 各模块功能及构成介绍如下:

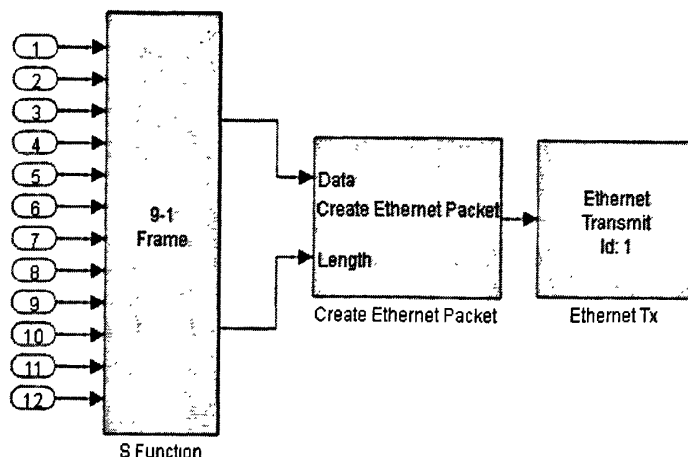


图3-4 基于xPC的9-1合并单元模型

1-12路输入：合并单元可以接入的最多12路电压、电流信号。

9-1 Frame模块：为S函数子系统，用于组建9-1数据帧，程序流程图如图3-5所示。由于ASDU状态量数据集在实际中应用较少，仅考虑了基本数据集的组帧。组帧流程如下：

- 1) 仿真开始后，进行S函数的初始化，并为9-1数据帧分配内存。
- 2) 读取用户在合并单元参数设置对话框中输入的参数，包括每帧包含ASDU个数、APPID、优先级、额定值、状态字、采样速率、配置版本号等。
- 3) 将除12路采样值和采样计数器以外的各项（仿真期间固定不变）分别转换为大端编码的8位字节串（ASN.1规定为大端编码）并填入数据帧相应位置。
- 4) 采样时刻到达后，将输入的12路采样值根据额定值变换后转换为大端编码的8位字节串并填入数据帧当前ASDU的相应位置；更新采样计数器数值，并转换为大端编码的8位字节串后，填入数据帧当前ASDU的相应位置。
- 5) 全部ASDU填满后，输出数据帧和数据帧长度。
- 6) 判断仿真是否停止，如果没有停止，则进入下一个组帧过程。

组帧完成后，通过CreateEthernetPacket模块构造数据包，利用EthernetTx模块发送数据包（即符合IEC 61850-9-1的采样值报文）。

各模块参数设置完毕后封装为MergingUnit子系统，设定外形如图4-4中的MergingUnit所示，可配置参数包括：组播MAC地址、APPID、每帧包含ASDU个数、额定相电流、额定中线电流、额定相电压、额定延时、状态字1，状态字2、采样速率等。

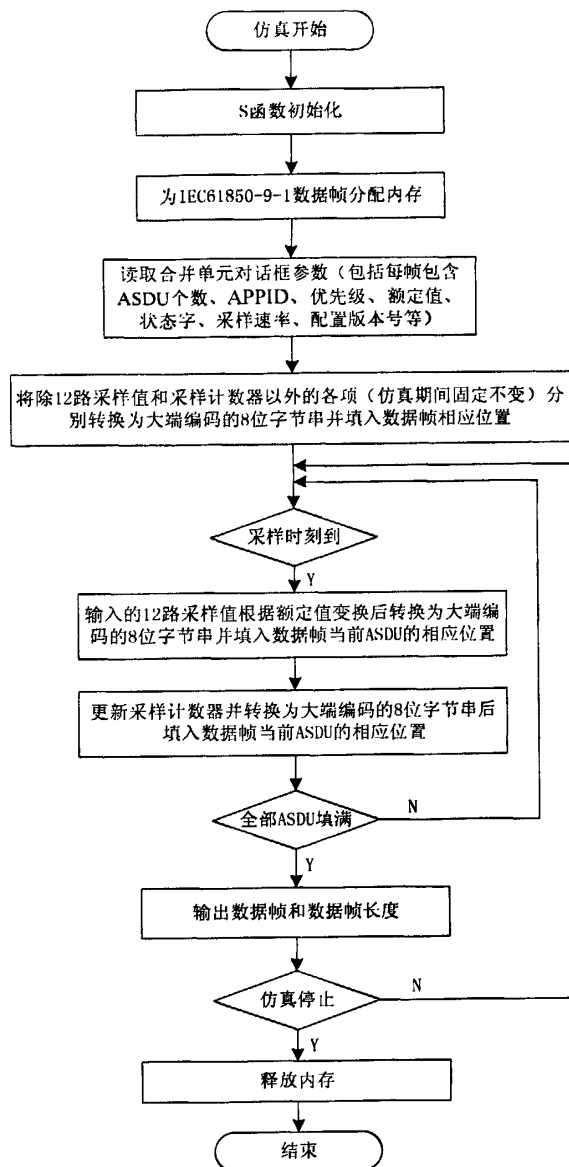


图3-5 9-1报文的组帧过程

(二) 符合IEC 61850-9-2LE的合并单元模型

目前，IEC 61850-9-2LE是有UCA（美国电科院制定的公共通讯体系）国际用户联盟制定的IEC61850-9-2的实施指南，是为了更快地将IEC61850-9-2引入市场而制定的。西门子、ABB等公司的产品予以支持，应用较为广泛。其数据集（DataSet）格式固定为8路电压电流信号，即三相电压电流和零序电压电流。例外，该实施指南针对保护和测量两种用途，定义了两种合并单元配置模式：保护用合并单元采样频率为每周波采样80个点，数据帧包含1个ASDU。即采样一次发送一次报文；测量用合并单元采样频率为每周波采样256个点，每个数据帧包含8个ASDU，采样8次发送一次报文。图3-6显示测量用合并单元报文的APDU的ASN.1编码结构。本

文构建了符合IEC 61850-9-2LE的合并单元模型，下面予以介绍。

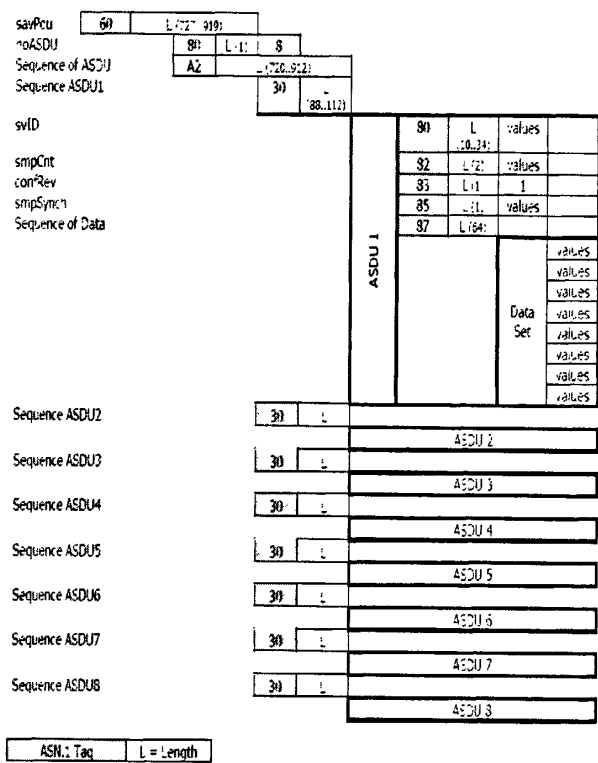


图3-6 ASN.1表示的IEC 61850-9-2LE报文的APDU

IEC 61850-9-2LE所定义的合并单元数据帧的ASN.1编码较为复杂，组帧模块同样用S函数自定义模块来实现（图3-7）。

1-8路输入：IEC 61850-9-2LE定义的8路电压、电流信号。

9-2Frame模块：输入8路电压、电流采样值，在完成报文的组帧和ASN.1编码后，输出数据帧和帧长度值。S函数组帧过程如图3-8，ASN.1编码方法详见附录。

组帧完成后，通过CreateEthernetPacket模块构造数据包，利用EthernetTx模块发送数据包（即符合IEC 61850-9-2LE的采样值报文）。

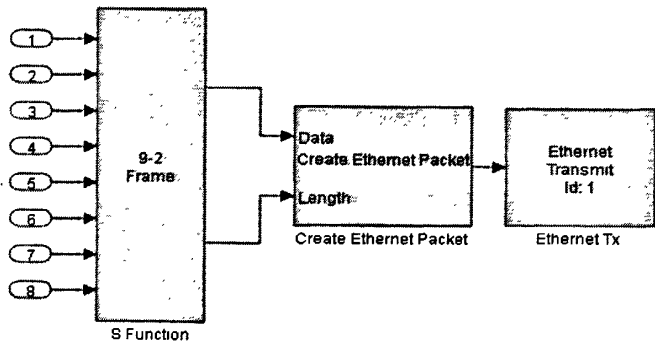


图3-7 IEC 61850-9-2LE报文的发送

各模块参数设置完毕后封装为MergingUnit (9-2) 子系统, 可配置参数包括: 组播MAC地址、采样值控制块ID、数据集名称、每帧包含ASDU个数、额定相电流、额定零序电流、额定相电压、配置版本号、同步信息等。

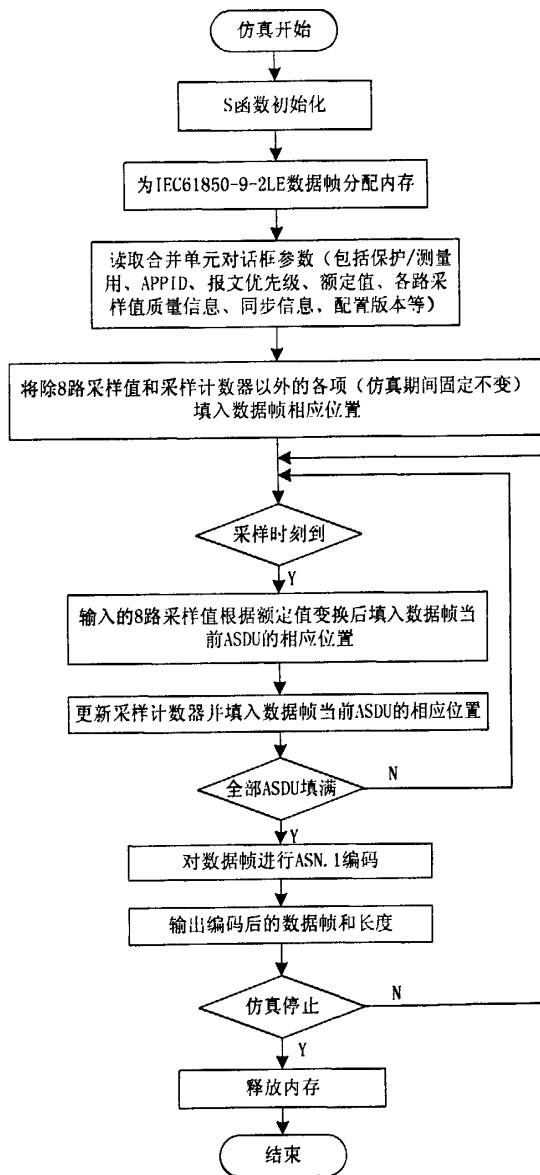


图3-8 IEC 61850-9-2LE报文的组帧

3.3.3 智能断路器控制模块的组建

所构建的智能断路器控制模块 (图3-9), 主要完成三步的控制流程: 接收并解析GOOSE报文→实现断路器控制逻辑→发送断路器变位GOOSE。图中各模块的具体功能为:

- 1) GOOSE-Unpack模块 (S函数子系统) 解析接收到的跳闸GOOSE报文, 包括报文的ASN.1解码和报文中跳闸数字信号的分离;

- 2) TripJudge模块（S函数子系统）判断接收到的GOOSE跳闸信号，实现断路器控制逻辑，输出断路器跳合闸信号；
- 3) goosesendcontrol模块（S函数子系统）控制GOOSEsend模块发送断路器变位GOOSE，实现图2-6所示的GOOSE心跳发送机制；
- 4) GOOSEsend模块完成断路器变位GOOSE的发送功能。它是一个使能子系统，即它根据输入的控制信号使能或者禁止自身内部的功能。图3-10显示其内部实现，GOOSEFrame完成数据的组帧和ASN.1编码，Create Ethernet Packet模块构造数据包，EthernetTx模块发送数据包。（GOOSE的组帧流程与9-2LE报文的组帧流程基本一致，同样为先组帧后编码的流程，不再赘述。）

智能断路器控制模块trip输出接到断路器模块的com口（图3-11），在实时仿真过程中完成断路器的控制功能。

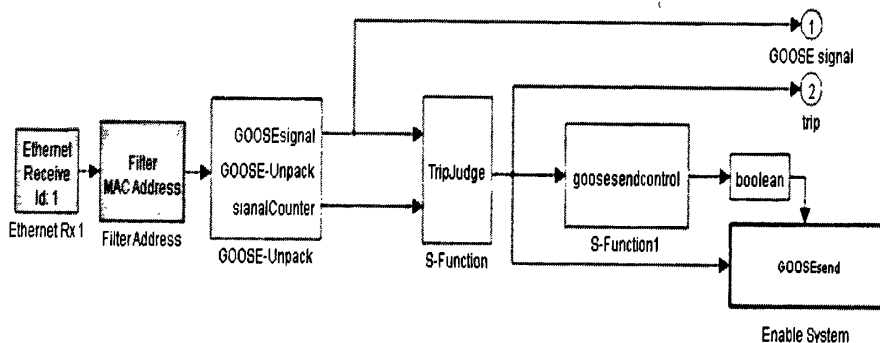


图3-9 智能断路器控制模块内部结构图

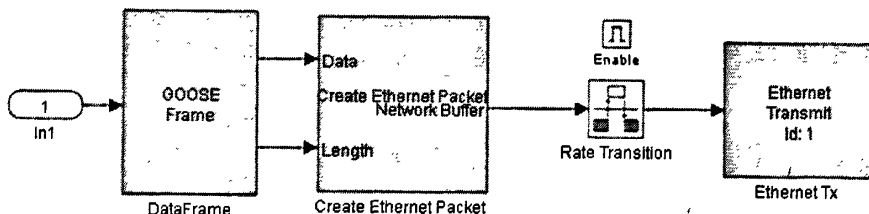


图3-10 断路器变位GOOSE报文的发送

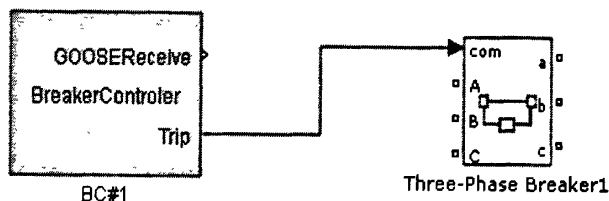


图3-11 智能断路器控制模块控制断路器

依据《DL/T860实施技术规范》^[74]，该智能断路器模块发送和接收的GOOSE报文中数据集的成员限制为数据属性。同时，为了加快报文的ASN.1编解码以减少仿真时CPU的负担，将数据集限制为“数据值-数据质量-时间戳”数据属性序列的组合，例如：

```
<DataSet name="PubGOOSE" desc="">
  <FCDA ldInst="CTRL" prefix="Q0" lnInst="1" lnClass="CSWI" doName="Pos"
daName="stVal" fc="ST"/>
  <FCDA ldInst="CTRL" prefix="Q1G" lnInst="1" lnClass="CSWI" doName="Pos"
daName="q" fc="ST"/>
  <FCDA ldInst="CTRL" prefix="Q2G" lnInst="1" lnClass="CSWI" doName="Pos"
daName="t" fc="ST"/>
</DataSet>
```

论文采用的 ASN.1 编解码方法详见附录。

3.4 本章小结

MATLAB/Simulink/xPC 提供了一种成本较低、实现方便的实时仿真系统的构建方法。本章首先将该方法与其他几种在 MATLAB 基础上实现实时仿真的方法做了比较，说明了选择该方法的原因，然后详细介绍了 xPC 双机实时仿真机制及其简便的以太网通信实现方法，最后详细介绍了本实时数字仿真系统的构建过程，包括合并单元和智能断路器仿真模块的建立以及采样值和 GOOSE 传输的实现方案。

第四章 数字保护测试系统的开发

4.1 测试系统总体结构

随着电力系统的发展及继电保护的数字化进程，继电保护测试系统的发展趋势是应具备数字化、高效的数据处理能力、完善的测试功能、装置模块化、界面友好等特点。测试软件模块化、测试过程自动化、测试报告自动分析等成为继电保护测试手段的新的发展方向^[59-61]。

本文在上一章介绍的实时数字仿真系统的基础上建立了数字保护测试系统。为实现保护装置快速的流程化测试，构建了典型的测试方案并用 MFC 开发了友好的图形用户界面。测试系统的总体结构如图 4-1 所示。

主机上运行 MATLAB 和图形用户界面程序 (GUI)。基于上一章描述的仿真模型的搭建方法建立了多种典型测试系统模型，如 220KV 双回线系统模型，220KV 环网系统模型等。图形用户界面程序与在后台运行的 MATLAB 交互，具有测试流程控制、波形显示、数据分析等功能。测试过程中，图形用户界面程序控制后台运行的 MATLAB 与目标机交互，将实时目标程序下载到目标机的 xPC 实时内核中，控制实时目标程序的运行，并将仿真数据上传到主机上。实时目标程序就是实时仿真程序，在运行的过程中输出采样值报文并接收和发送 GOOSE 报文。

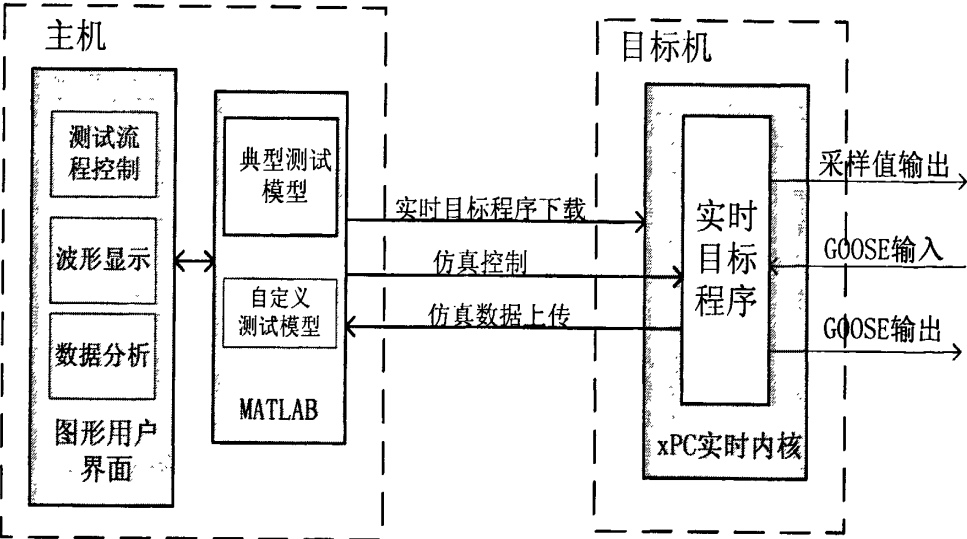


图 4-1 测试系统的总体结构

另外,本测试系统基于 xPC 双机实时仿真机制,为使实时仿真达到预期效果,对系统的运行环境提出要求,包括软件和硬件两方面,如图 4-2 所示:

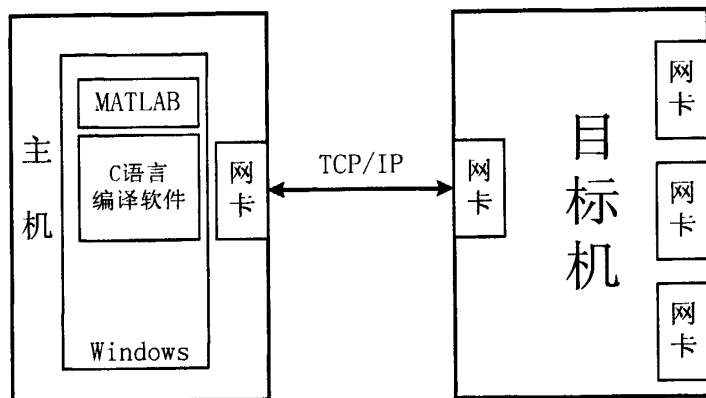


图 4-2 测试系统的运行环境

硬件要求:

(1) 主机: CPU 性能无具体要求,当前主流型号即可;内存 $\geq 128\text{M}$,硬盘 $\geq 10\text{G}$,光驱具有 CD 刻录功能及以上,至少具有 1 个以太网卡,需要配有显示器。当前大多数笔记本或台式机可以满足要求。

(2) 目标机: 由于电力系统的实时仿真要求步长较小,对目标机 cpu 性能要求较高,本文采用 AMD 3600+双核处理器,经试验可以满足要求;内存 $\geq 128\text{M}$;CD 光驱;硬盘容量无要求,需具有空闲空间存放仿真数据;主板要求具有三个及以上空闲 PCI 插槽安装网卡;可以不配显示器。目标机可以选择工控机、嵌入式 PC 机或普通兼容 PC 机。由于笔记本电脑没有 PCI 插槽不能作为目标机。

(3) 通讯要求: 主机具有 1 个以太网卡(集成或独立皆可),目标机安装三块 PCI 独立网卡,所支持的网卡型号参见文献 62.。

软件要求:

(1) 主机: Windows 2000/ Microsoft Windows XP 及以上操作系统, MATLAB2009a 及更新版本,编译软件如 Visual Studio9.0 等。

(2) 目标机: 不需要任何操作系统及应用软件,需要兼容 PC 机的 BIOS 即可。为使仿真具有更好效果,需要对 BIOS 进行一系列设置,包括禁用 USB 功能、禁用超线程、禁用省电模式等。

4.2 典型测试系统方案

目前,国内动模试验所依据的标准是《电力系统继电保护产品动模试验》(The dynamic test of the power system protective relays)(DL/T871-2004)^[63]。该标准中

提供了通过动模试验对继电保护装置进行测试的典型测试系统并推荐了各元件的参数指标，以满足不同电压等级下短距离和中长距离线路保护以及母线保护、变压器保护测试的典型测试系统。本测试系统所要实现的功能与动模试验是一致的，因此为便于测试，参照该标准和中国电力科学研究所使用的测试方案搭建了多种典型测试系统的模型^[64]。模型中的元件参数指标和技术性能满足上述标准的要求。根据测试装置类型及电压等级的不同，应建立如表 4-1 所示典型测试系统模型。

表 4-1 各电压等级典型测试系统模型

电压等级	110kV	220kV	500kV
典型系统	发电机单回线系统 单回线系统（单电源） 单回线系统（双电源） 三环网系统 双回线系统（单电源） 双回线系统（双电源）	发电机双回线系统 单回线系统（单电源） 单回线系统（双电源） 环网系统 双回线系统（单电源） 双回线系统（双电源） 变压器保护 变压器空投实验 母线保护	单回线系统（单电源） 单回线系统（双电源） 发电机环网系统 环网系统 双回线系统（单电源） 双回线系统（双电源） 同塔双回线系统 串补系统

以下以 220KV 双回线系统（单电源）为例，说明典型模型的建立过程：

(1) 确立图 4-3 所示的该系统单线图，并根据《电力系统继电保护产品动模试验》标准规定的主要参数确定系统内各元件的参数。

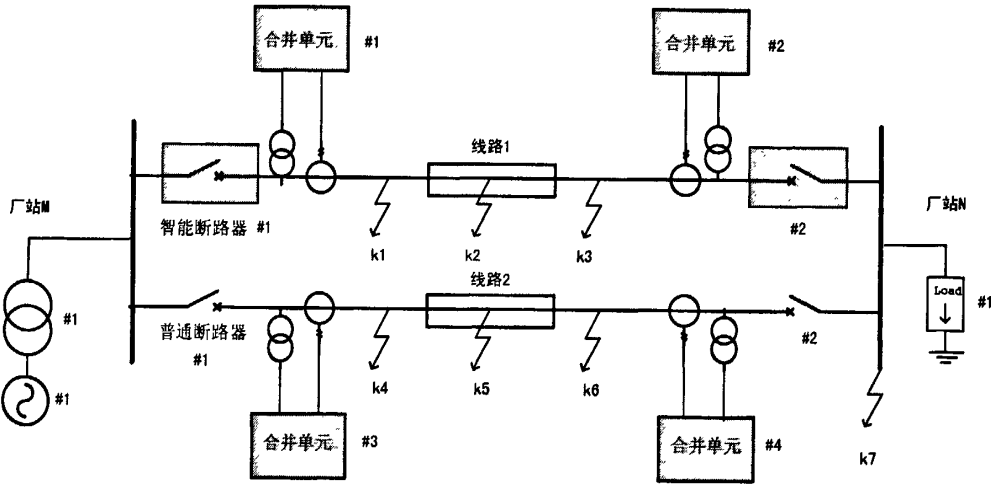


图 4-3 220KV 双回线系统（单电源）

(2) 搭建 Simulink 电力系统仿真模型如图 4-4 所示，并设定各元件参数。分别在线路出口、中间、末端以及母线处添加故障模块。线路一两端的#1、#2 断路

器为智能断路器模块，其它为普通断路器模块。设定断路器及故障模块参数。

(3) 在智能断路器之前添加三相电压电流测量模块，添加合并单元模块（以 9-1 合并单元为例），并将三相电压电流接入合并单元模块。

(4) 添加 xPC 库模块：包括网卡初始化模块（3 个）和缓冲区管理模块（1 个），并依据目标机网卡实际配置情况设置其参数，其中：ID 分别选择 1 号、2 号、3 号网卡，源 MAC 地址参数依据 IEC61850 设置为 01-0C-CD-01-00-01 至 01-0C-CD-01-01-03。

(5) 设定合并单元参数：网卡号设为 1，目标 MAC 地址设为 FFFFFFFF，其他使用默认参数。

(6) 设定智能断路器参数：GOOSE 接收网卡号设为 2，GOOSE 发送网卡号设为 3。其他暂使用默认参数（MAC 地址设置需参考被测装置的 MAC 地址）。

(7) 在 Normal 仿真模式下非实时仿真，查看波形，验证模型正确性。

至此，模型搭建完毕，可以编译下载到目标机上实时仿真。下载后目标程序仍可以修改部分模型参数，例如故障类型、故障时间、重合闸类型、重合闸时间等。这使得用户需要修改部分模型参数时不必重新编译，提高了效率。

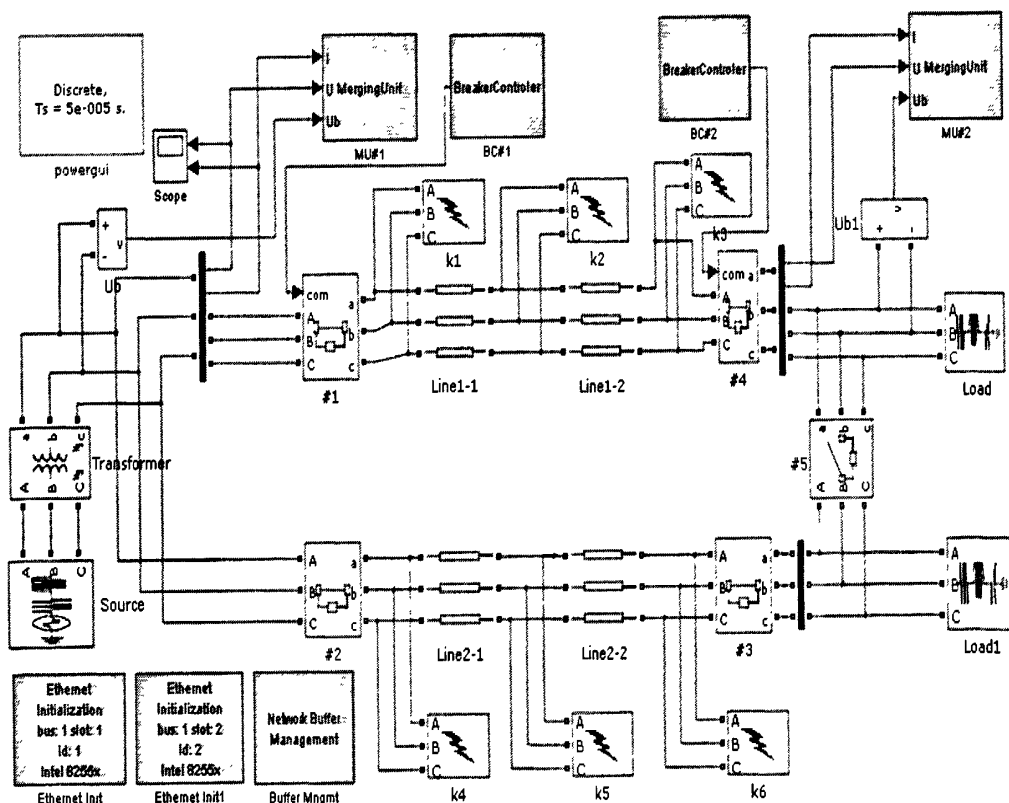


图 4-4 220KV 双回线系统（单电源）测试模型

4.3 图形用户界面的开发

随着软件开发技术的发展,具有友好的用户界面成为应用软件开发的基本要求。日前大多数应用软件都是基于 Windows 操作系统环境下运行的,均具有与 Windows 相同的图形用户界面(GUI),这使得用户只要熟悉 Windows 操作系统就很容易使用这些应用软件。

Visual C++是图形用户界面应用程序开发的常用工具,它使用了 MFC(微软基础类)作为程序开发的基础。MFC 确定了应用程序的主要框架和基本功能,完成了窗口、图标、菜单、按钮等用户界面的设计,软件开发者只需要合理布局上述图形元素并完善和添加消息响应函数,就可以完成应用程序的设计^[65]。

本文利用 MFC 开发了测试系统的图形用户界面程序。图形用户界面与后台运行的 MATLAB(MATLAB 引擎)交互完成继电保护装置的测试。这使得测试系统具有了中文的图形界面,而且使用者可以不必了解 MATLAB、SIMULINK 以及 xPC 的使用方法而完成测试,同时使得测试过程更加流程化、便捷化。下面具体介绍测试系统图形界面的开发过程。

4.3.1 MATLAB 计算引擎简介

MATLAB 计算引擎是一系列允许用户在别的程序中与 MATLAB 交互的函数库和程序库。在调用的过程中,MATLAB 引擎工作在后台,MATLAB 通过它与其他程序进行通信,由于它工作起来像一个汽车发动引擎,所以由此得名。这种方式具有很多优点,工作时不需要整个 MATLAB 与程序相连,节省了大量的系统资源,使整个应用程序整体性能更好,处理效率更高^[55,66]。

MATLAB 引擎采用的是客户机/服务器计算模式。VC 与 MATLAB 之间交互的实质是利用 ActiveX 自动化和 DDE 技术实现 VC 与 MATLAB 之间的动态数据交换。在 VC 中使用 MATLAB 引擎编程,VC 是作为客户端出现的,负责用户接口和提出数据请求;而 MATLAB 属于服务器端,即向客户端提供数据服务,VC 通过调用 MATLAB 引擎与 MATLAB 建立连接,从而实现动态数据交换。在 VC 应用程序中通过调用接口函数实现对 MATLAB 的控制,主要函数及其功能如下:

- Engine *engOpen(const char *startcmd); 打开 MATLAB 引擎。
- int engClose(Engine *ep); 关闭 MATLAB 对话引擎。
- int engEvalString(Engine *ep, Const char *string); 向 MATLAB 环境发送命

令字符串。

- `mxArray *engGetVariable(Engine *ep, const char *name);` 从 MATLAB 引擎读取数据。
- `int engPutVariable(Engine *ep, const char *name, const mxArray *mp);` 向 MATLAB 环境中写入数据。

利用 `engEvalString` 函数可以实现 MATLAB/Simulink 中所有可以通过命令方式完成的功能，包括模型文件的打开和关闭、模块参数的修改、仿真参数的调整等，并且可以控制 xPC 目标程序的运行。

4.3.2 测试系统图形用户界面设计

本文设计了一套完整的实时仿真测试系统界面，由于页面众多，现将主要页面的功能和使用方法进行说明。

图 4-5 给出了测试系统的欢迎界面，点击“开始测试”后进入测试系统主界面，在主界面下通过点击相应按钮进入各子界面，子界面是按照测试流程来排的，包括仿真初始化、参数设置和仿真控制界面（图 4-6、4-7、4-8），默认仿真初始化界面。



图 4-5 欢迎界面

仿真初始化界面包括启动 MATLAB 引擎、设置编译器等初始化工作，若有需要用户还可以显示 MATLAB 命令窗口，与 MATLAB 直接交互。

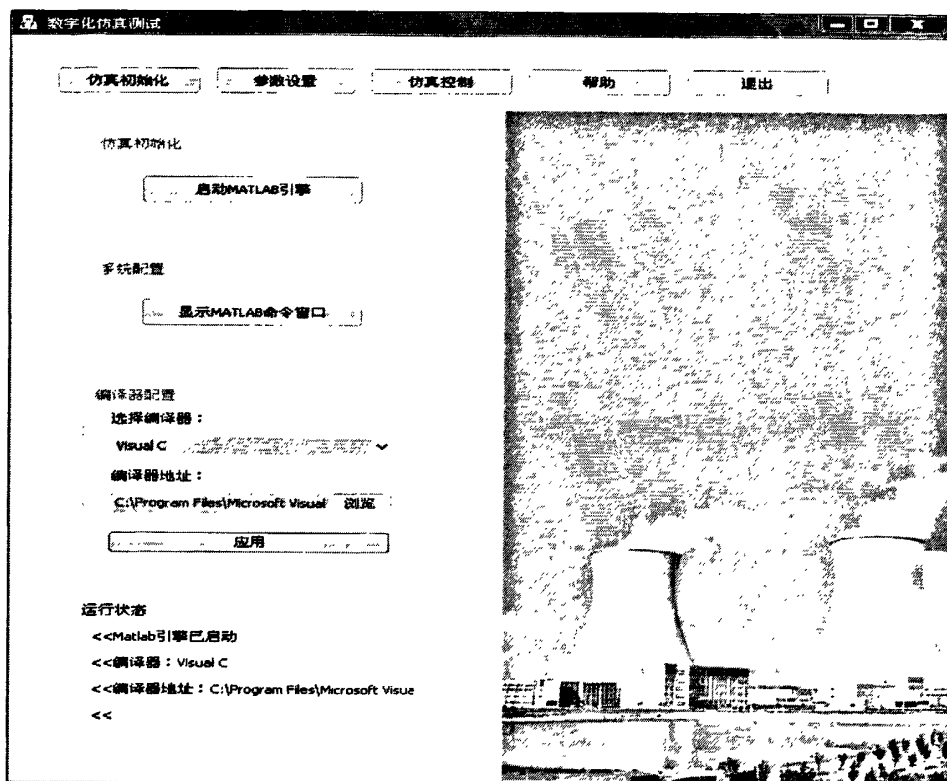


图 4-6 仿真初始化界面

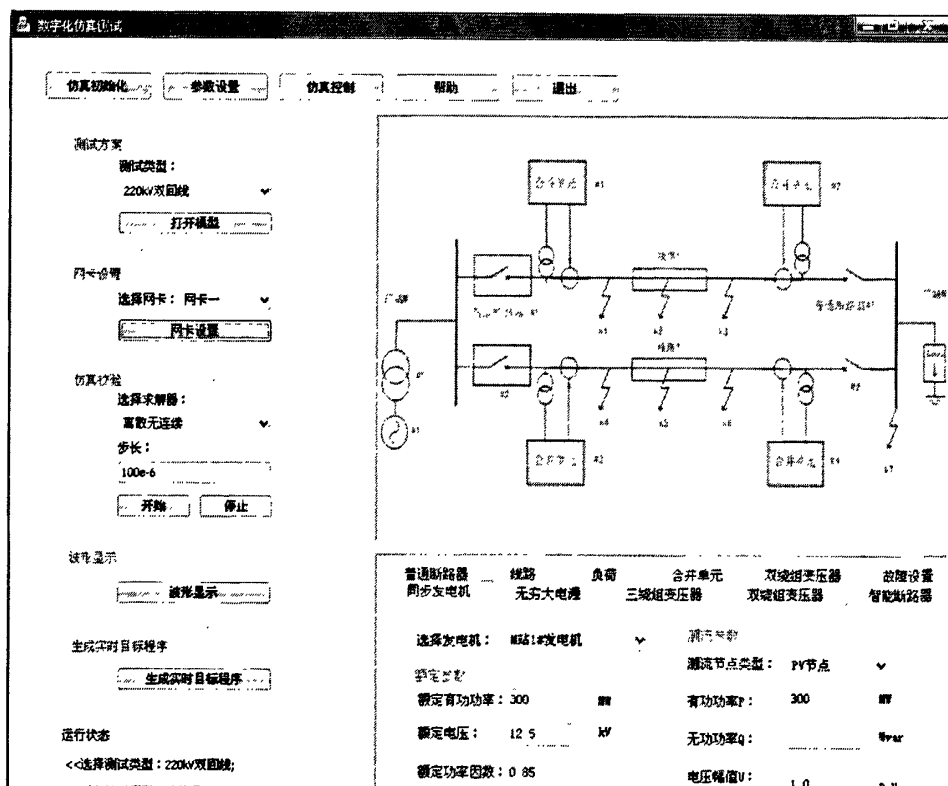


图 4-7 参数设置界面

参数设置界面主要是为了方便用户进行仿真系统参数进行设置，包括元件参数、求解器参数、网卡参数的设置以及故障参数的设置。参数设置完成后，用户可以对模型进行非实时仿真校验，通过查看电压电流波形检验参数是否设置正确、仿真结果是否正确。还可以通过设置多种故障类型，检验仿真系统暂态性能。如果仿真结果正确，生成实时目标程序。

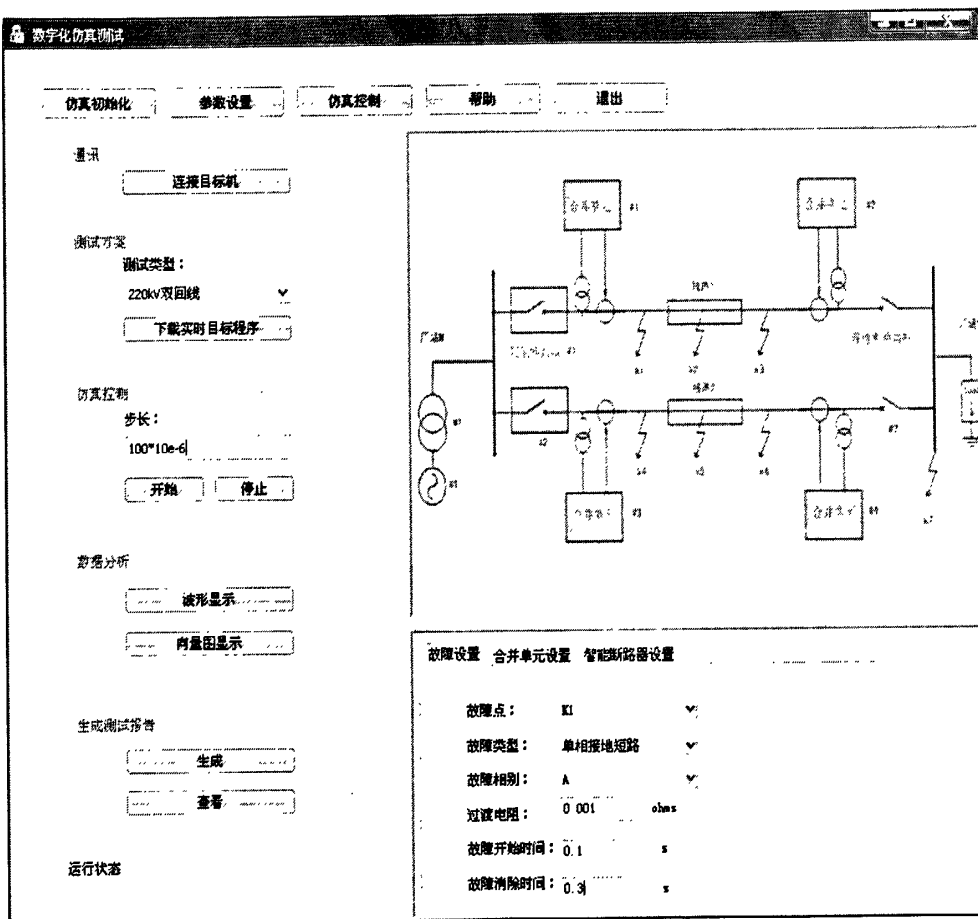


图 4-8 仿真控制界面

仿真控制界面是实时仿真操作界面，包括连接目标机、下载实时目标程序到目标机、控制仿真进度、仿真结束后的波形分析和向量图分析以及测试报告的生成与查看功能。其中，数据分析功能还有待于进一步完善，通过数据分析考察数字继电保护装置的动作性能。

4.4 数字式继电保护装置的测试流程

数字式继电保护装置的测试流程如下（图 4-9）：制定测试计划；搭建测试系统平台；运行测试；测试项目完成，试验结束，生成测试结果。

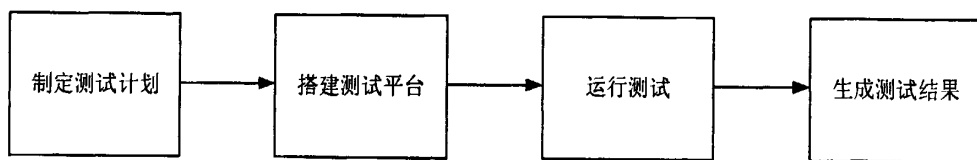


图 4-8 测试流程

(1) 制定测试计划

在测试软件主界面中根据测试装置实际情况选择典型测试系统，如默认参数不能满足试验需求，计算并修改模型参数，重新生成目标程序。

(2) 搭建测试平台

将主机、目标机和被测装置组成测试系统平台。将安装测试软件的主机通过交叉双绞线与目标机通过以太网口连接，目标机实时通讯网口和数字化保护装置的网口均接到交换机，构成闭环测试系统。

(3) 运行测试

在测试系统搭建完成后，启动目标机，设置主机的 IP 地址为 192.168.1.2-192.168.1.255 之间任意 IP。连接目标机，连接成功后还可以再进行有关采样值报文和 GOOSE 报文的设置，如合并单元的采样率、保护用电流额定值、测量用电流额定值、零序电流额定值、电压额定值，电压的比例因数和智能断路器的 GOOSE 接收和发送 MAC 地址等。运行测试。

(4) 生成测试结果

测试仪将实时电压电流数据发送至被测保护装置，接收其跳闸 GOOSE 报文，生成测试结果，测试流程结束。然后可以观察电压电流波形，分析保护动作行为。这时，如果测试结果不满足预先设置的评估条件，可以按照本测试流程重复测试，必要时修改测试系统参数重新测试。

4.4 本章小结

在上一章所建立的实时仿真系统基础上，开发了数字继电保护测试系统。首先介绍了本测试系统的总体结构和软硬件环境，然后介绍了满足测试要求的典型测试系统的搭建过程以及基于 MFC 和 MATLAB 引擎的图形用户界面的开发过程，最后介绍了使用本测试系统进行数字继电保护装置测试的流程。

第五章 测试系统功能与性能的检验

5.1 测试系统的功能要求

数字化变电站的建设为继电保护等二次设备的技术发展提供了契机，同时也给保护装置的入网测试带来了新的挑战。为满足数字保护装置的测试要求，本文建立了电力系统实时数字仿真系统，并在此基础上开发了数字保护测试系统。

本测试系统的设计目标是：能够为数字化保护装置和其它二次设备提供与实际数字化变电站相一致的二次接口特征和工作环境，完成各项测试任务。为达到这一目标，测试系统所具有的功能可以概括如下：

- ① 实时仿真电力系统暂态过程，包括各种短路故障和重合闸状态下的暂态过程，输出采样值和跳闸报文，为评估数字化保护装置的功能和性能，提供最为真实的测试环境；
- ② 接收和分析 GOOSE 信息，评估被测保护的動作时间；
- ③ 开发基于 IEC 61850 标准的智能电子设备；
- ④ 研究数字化变电站的相关技术，包括各种通信机制等。

5.2 测试系统的性能要求

为了检验本测试系统的可靠性，使测试结果更具有说服力，在进行数字化保护装置试验前，需要对其进行全面的性能检测，其中通信性能检测尤为重要^[67-73]。

通信性能主要包括三个方面：采样精度、时间同步和传输时间延迟。针对这三个方面所要求的指标均在 IEC 61850-5^[67]中给予了详尽的规定。其中，针对各种不同类型的报文规定了其性能要求，同时考虑到变电站的不同需求，同一类报文还划分了性能级：控制和保护功能、测量仪表和电能计量功能各分为三个性能级，如表 5-1 所示。由于性能级由所需功能决定，因而它们与变电站的大小无关。GOOSE 报文传输时间延迟的要求如表 5-2 所示。采样值报文传输时间延迟及数据精度的要求如表 5-3 所示。

表 5-1 报文性能级定义

功能	性能级	适用范围
控制和保护功能	P1	一般用于配电线间隔或其他要求较低的间隔
	P2	一般用于输电线间隔或用户另外规定的地方
	P3	一般用于输电线间隔，具备满足同步和断路器分合时间差的最好性能

测量仪表 和电能计 量	M1	用于具有精确度级为 0.5 级（IEC 62053-22）和 0.2 级（IEC60044-8） 的计费计量，最多 5 次谐波
	M2	用于具有精确度级为 0.2 级（IEC 62053-22）和 0.1 级（IEC60044-8） 的计费计量，最多 13 次谐波
	M3	用于电能质量计量，最高 40 次谐波

表 5-2 GOOSE 报文传输时间延迟的要求

GOOSE 报文类型	性能级	传输时间延迟
跳闸报文	P1	≤10ms
	P2/P3	≤3ms
其他 GOOSE	P1	≤100ms
	P2/P3	≤20ms

表 5-3 采样值报文传输时间延迟及数据精度的要求

数据类型	性能级	传输时间 ms	分辨率（幅值） Bits	频率 采样次数/s
电压/电流	P1	10.0	13	480
电压/电流	P2	3.0	16	960
电压	P3	3.0	16	1920
电流	P3	3.0	18	1920
数据类型	性能级	精度和谐波	分辨率（幅值） Bits	频率 采样次数/s
电压	M1	0.5 级（IEC62053-22）	12	1500
电流		0.2 级（IEC60044-8） 最高 5 次谐波	14	
电压	M2	0.2 级（IEC62053-22）	14	4000
电流		0.1 级（IEC60044-8） 最高 13 次谐波	16	
电压	M3	0.1 级（IEC 未规定） 最高 40 次谐波	16	12000
电流			18	

由于本测试系统的通信模块（合并单元、智能断路器）在仿真期间是同步采样的，而且本系统不存在 AD 转换过程，数据精度的变化仅在于数据类型的转换过程中，因此后文将主要针对该系统传输时间延迟方面进行性能检验。IEC 61850-10^[68]对变电站网络和系统的通信延时、时间同步和准确性的测试提出了要求并提供了测试方法框图。本文将参照该标准对本系统进行性能测试。

5.3 测试系统功能与性能的检验

由于测试系统性能很大程度上取决于目标机配置情况和网络传输设备，因此将主要硬件情况予以说明：目标机 CPU 为 AMD3600+双核处理器，主频为 2.0GHz；网络传输设备：Intel 以太网网卡、普通五类双绞线和普通交换机（不支持以太网优先级）。

5.3.1 合并单元性能测试

搭建如图 5-1 所示系统模型检验合并单元性能。其设计思路为：简单一次系统

模型, 仅仿真单相接地故障情况; 利用 Mu-Unpack 模块将接收到的采样值数据包解码, 输出各项数据信息; 用 FileScope 记录合并单元组帧前和 Mu-Unpack 解码后的三相电压电流, 比较两者数据精度, 分析合并单元数据精度; 用 FileScope 记录采样值计数值, 设置以太网接收模块比合并单元发送模块具有更高的采样频率, 以考察合并单元报文传输时间性能。

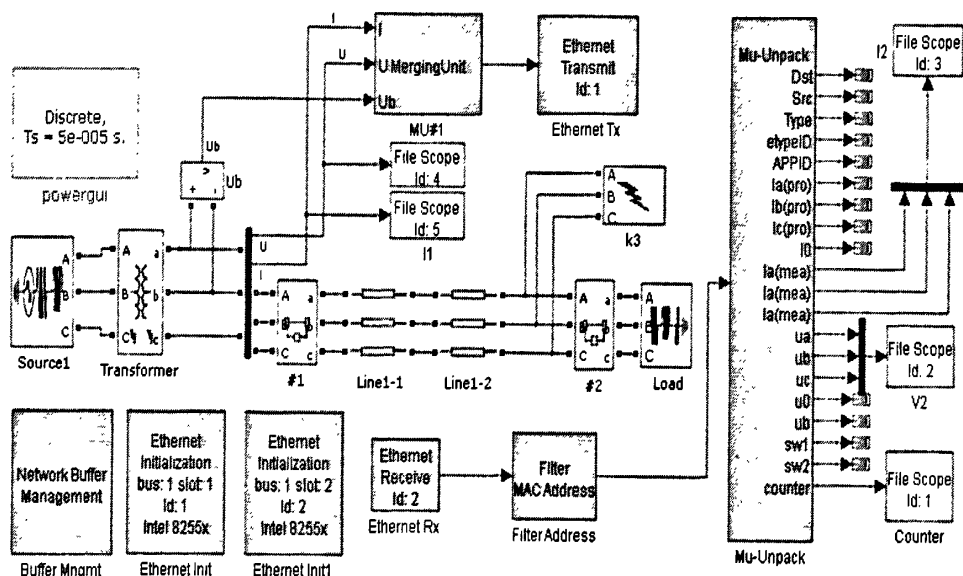


图 5-1 合并单元性能测试模型

(一) 合并单元数据精度性能分析

图 5-2 所示为合并单元组帧前和 Mu-Unpack 解码后的 A 相（故障相）电压电流波形图，可以发现波形无明显差别；表 5-4 为某次试验暂态过程 A 相电压精度分析结果，可以看出误差在允许范围内，同时，发送数据与接收到的数据一致，验证了数字通信是没有误差的。

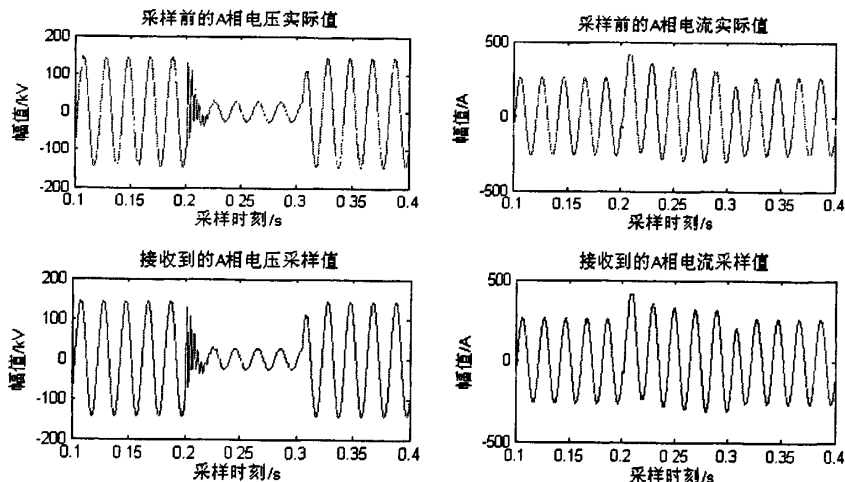


图 5-2 采样前 A 相电流和接收到 A 相电压电流比较

表 5-4 采样值报文传输时间延迟及数据精度的要求

计数	实际值	采样值（发送）	绝对误差	相对误差	采样值（接收）
1	-105.515	-105.528	-0.01331	0.0126%	-105.528
2	-103.744	-103.762	-0.01802	0.0174%	-103.762
3	-102.31	-102.319	-0.00803	0.0078%	-102.319
4	-100.508	-100.514	-0.00604	0.0060%	-100.514
5	-99.0075	-99.0142	-0.00674	0.0068%	-99.0142
6	-97.1745	-97.1912	-0.01671	0.0172%	-97.1912
7	-95.6087	-95.615	-0.00632	0.0066%	-95.615
8	-93.7452	-93.754	-0.00881	0.0094%	-93.754
9	-92.1173	-92.1208	-0.00353	0.0038%	-92.1208
10	-90.2221	-90.2408	-0.01878	0.0208%	-90.2408

（二）合并单元报文传输时间性能分析

将合并单元数据帧发送间隔设为 100us(10kHz)，数据帧接收时间间隔为 50us。表 5-5 所示为部分数据帧发送与接收时间点比较。经多次试验发现，90%以上的数据帧均在发送后的 50us 内被接收模块接收到且未发现丢包现象，所有数据帧均在发送后的 100us 内被接收模块接收到且未发现丢包现象，说明本合并单元传输时间延迟 $\leq 0.1\text{ms}$ ，满足 IEC61850 的要求。

表 5-5 采样值报文传输时间延迟及数据精度的要求

合并单元计数器值	发送时刻	接收时刻
760	0.0380	0.03805
761	0.0381	0.03815
762	0.0382	0.03825
763	0.0383	0.03835
764	0.0384	0.03845
765	0.0385	0.03855
766	0.0386	0.03865
767	0.0387	0.03875
768	0.0388	0.03885
769	0.0389	0.03895
770	0.0390	0.03905
771	0.0391	0.03915
772	0.0392	0.03925

5.3.2 GOOSE 性能测试

为测试 GOOSE 接收性能，需要提供 GOOSE 源，为此组建继电保护装置仿真模型如图 5-3 所示。judge 子系统模块将输入的电气量信息和其他信息进行判断，实现保护逻辑，输出保护动作信号；goosesendcontrol 是 S 函数子系统，它在接收保护动作信号后实现如图 2-4 所示的 GOOSE 发送机制，其中 T0、T1、T2、T3 均

为可设参数，它输出 GOOSE 发送控制命令；GOOSEFrame 是一个触发子系统（根据输入的使能信号执行或禁止内部功能），接收 GOOSE 发送命令后进行 GOOSE 报文的组帧、ASN.1 编码和报文发送功能。

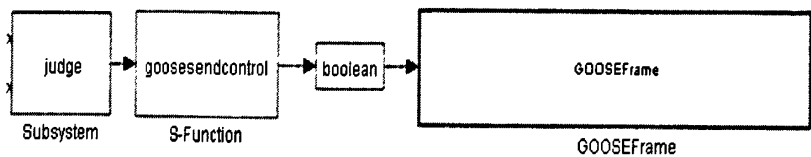


图 5-3 继电保护仿真模型

搭建如图 5-4 所示 GOOSE 测试模型：judge 模块实现电流速断保护逻辑，上方的继电保护模型用于发送跳闸 GOOSE 报文，下方的 BreakerControl（断路器控制）模块接收 GOOSE 报文，并输出解析出的 GOOSE 跳闸信号和用于直接控制断路器跳闸的 Trip 信号。用 FileScope 记录上述两信号，作为评价 GOOSE 性能的依据。

给继电保护模型加入如图所示阶跃触发信号（触发时间为 1.1S），GOOSE 发送时间依据《DL/T860 实施技术规范》^[74] 设置为：T0=500ms，T1=5ms，T2=10ms，T3=20ms。设置模型求解步长 100us，将模型编译下载后进行测试。测试结果如表 5-6 所示，GOOSE 报文均在发出后下一个采样时刻被断路器控制模块接收到，经多次试验，传输延迟≤200us，满足 IEC61850 对 GOOSE 性能的要求。图 5-5 显示 GOOSE 跳闸信号和 Trip 信号的波形的对比，同时验证了断路器控制模块的功能是正确的。

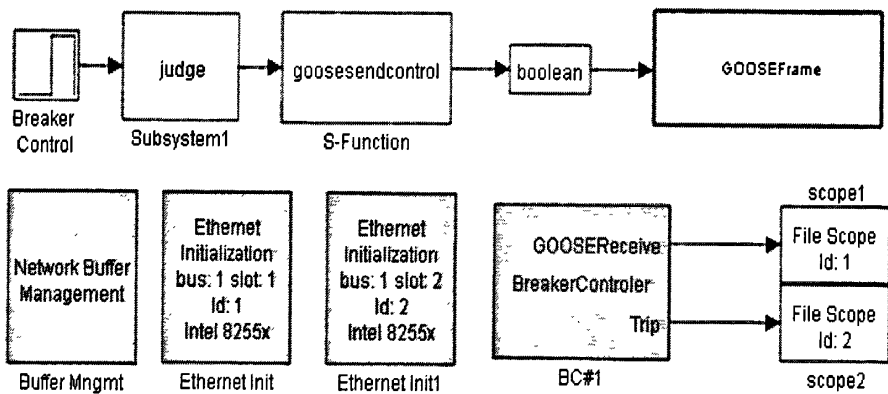


图 5-4 GOOSE 性能测试模型

表 5-5 采样值报文传输时间延迟及数据精度的要求

GOOSE 发送时间 (s)	GOOSE 接收时间 (s)	延迟 (us)
0.500 (循环发送 T0)	0.500100	100
1.000 (循环发送 2T0)	1.000100	100
1.100 (触发)	1.100100	100
1.105 (触发后 T1)	1.105100	100
1.110 (触发后 2T1)	1.110100	100
1.120 (触发后 2T1+T2)	1.120100	100
1.140 (触发后 2T1+T2+T3)	1.140100	100
1.640 (触发后 2T1+T2+T3)	1.640100	100

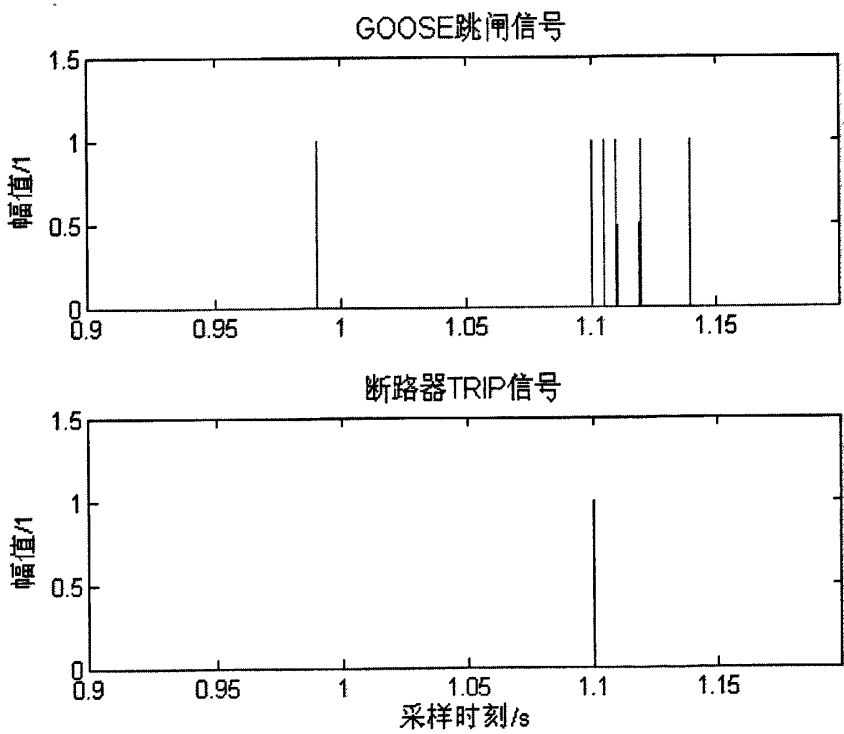


图 5-5 GOOSE 跳闸信号和 Trip 信号的波形的对比

5.3.3 集成测试

集成测试用于检验本测试系统的整体性能，同时测试其暂态仿真性能和通信性能。为此，建立如图 5-6 所示仿真模型，在单电源双回线系统模型中加入限时电流速断保护模型（易于观察波形），并使之具有重合闸控制功能，仿真故障重合闸过程，记录仿真电压电流波形，选取其中比较典型的仿真图形，并记录下试验的数据，进行分析。模型主要参数设置如下：

(1) 一次系统：电源额定电压为 10kV，短路容量为 1000MVA；理想变压器变比为 10 kV:220kV；四段分布参数线路长度均为 100km；末端负荷分别为 60MW；线路一两端断路器为智能断路器，线路二两端断路器为普通断路器，且在仿真期间不动作；线路末端母联断路器断开。

(2) 网卡初始化：PCI 总线号、槽号根据目标机网卡配置情况设定，MAC 地址设为 00-0C-CD-04-00-01、00-0C-CD-04-00-02 和 00-0C-CD-04-00-03，网卡缓冲区使用默认设置。

(3) 合并单元模块和智能断路器控制模块：合并单元分别配置为使用网卡一和网卡二，采样频率设为 10kHz，目标 MAC 地址为 ff-ff-ff-ff-ff-ff，ASDU 数目为 1，额定相电流为 200A，额定中线电流为 200A，额定相电压为 $220/\sqrt{3}$ kV，其他使用默认设置；智能断路器控制模块分别配置为网卡一和网卡二，只接收 GOOSE 不发送 GOOSE，接收源 MAC 地址为 00-0C-CD-04-00-03 的 GOOSE 报文。

(4) 限时电流速断保护模型：使用网卡三接收采样值报文和发送 GOOSE 跳闸报文，按保护安装于线路首段配置：接收源 MAC 为 00-0C-CD-04-00-01 的采样值报文，GOOSE 目标 MAC 也设为 00-0C-CD-04-00-01，电流动作值为 500A。

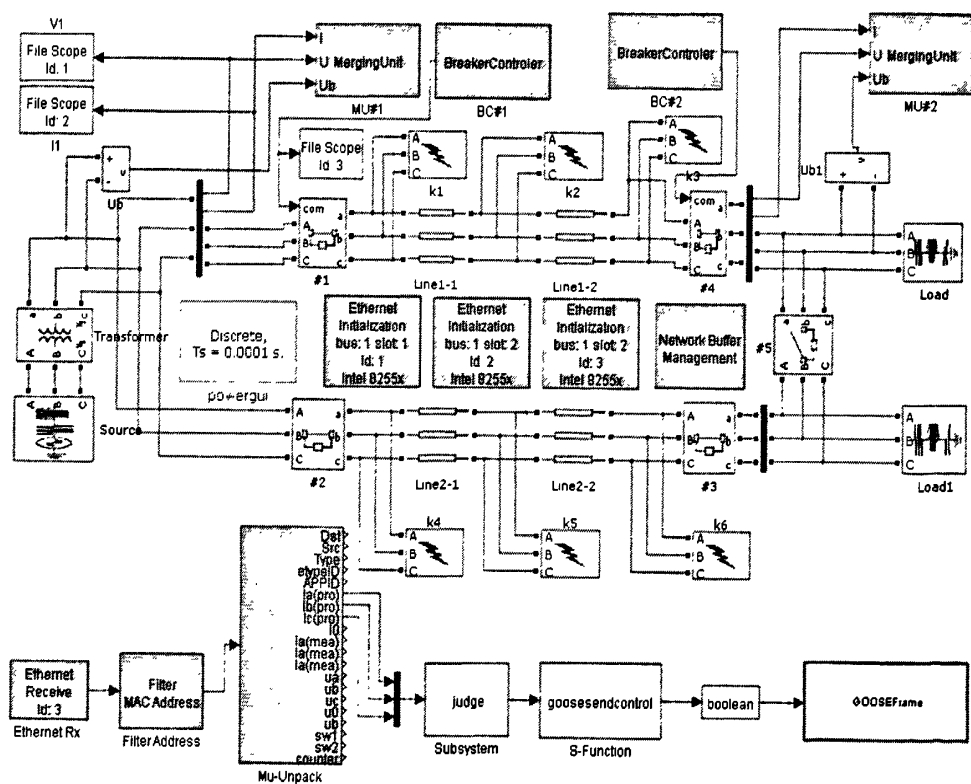


图 5-6 集成测试模型

(1) A相接地三相重合闸试验

设置限时电流速断保护限时动作时间 0.1s, 重合闸动作时间为 0.1s, 重合闸复归时间为 0.1s; 仿真永久故障情形, 设置 A 相接地时间为 0.1s~0.6s, 使得断路器第一次跳开后, 重合闸于故障, 断路器再次跳开后不再重合。试验结果如图 5-7 所示, 表明测试系统通信正常 (时延 $\leq 200\mu\text{s}$), 通信延迟满足测试要求, 智能断路器控制单元能够实时控制断路器开合 (时延 $\leq 100\mu\text{s}$)。

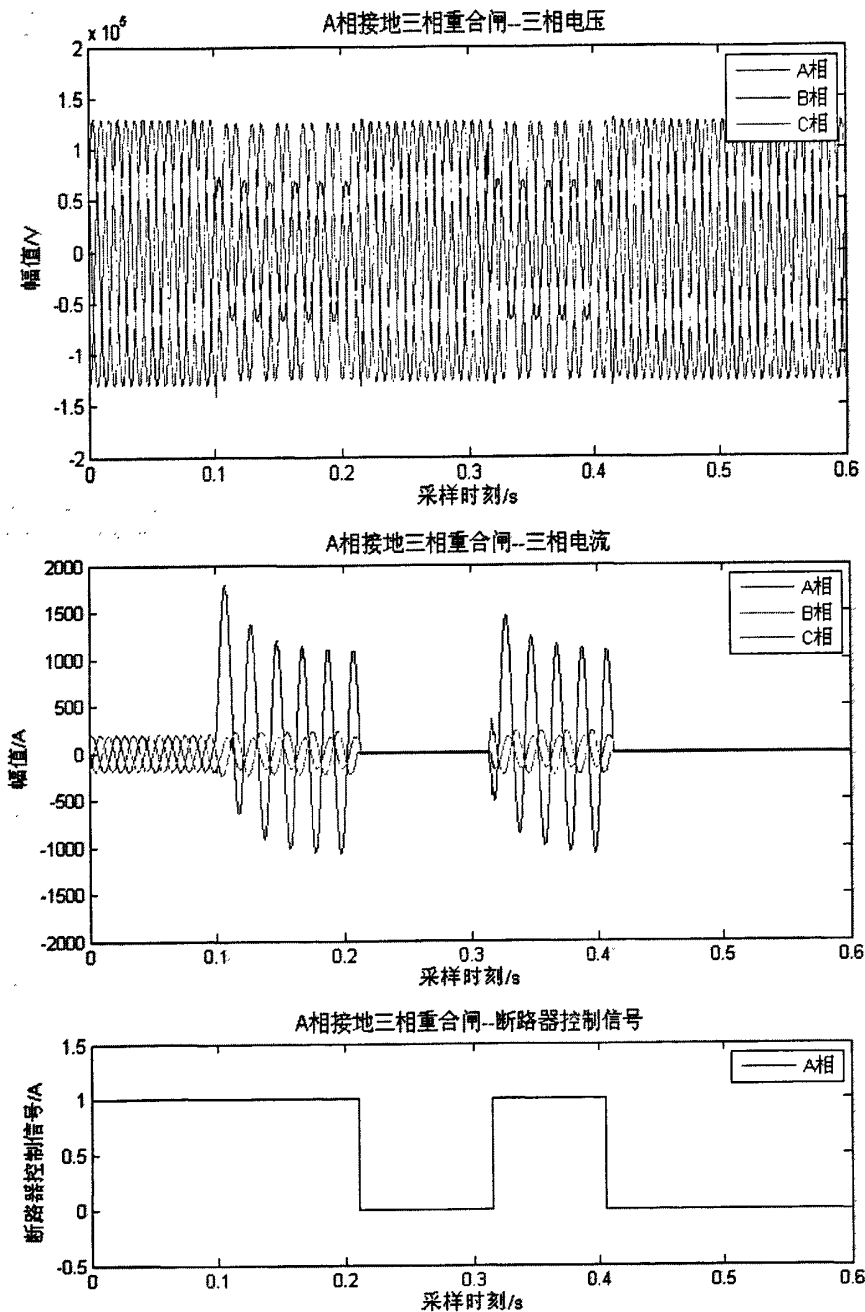


图 5-7 A 相接地三相重合闸试验三相波形与断路器控制信号

(2) AB 相接地三相重合闸试验

限时电流速断保护和故障时间同上，试验结果如图 5-8 所示，表明测试系统通信正常（时延 $\leq 200\mu\text{s}$ ），通信延迟满足测试要求，智能断路器控制单元能够实时控制断路器开合（时延 $\leq 100\mu\text{s}$ ）。

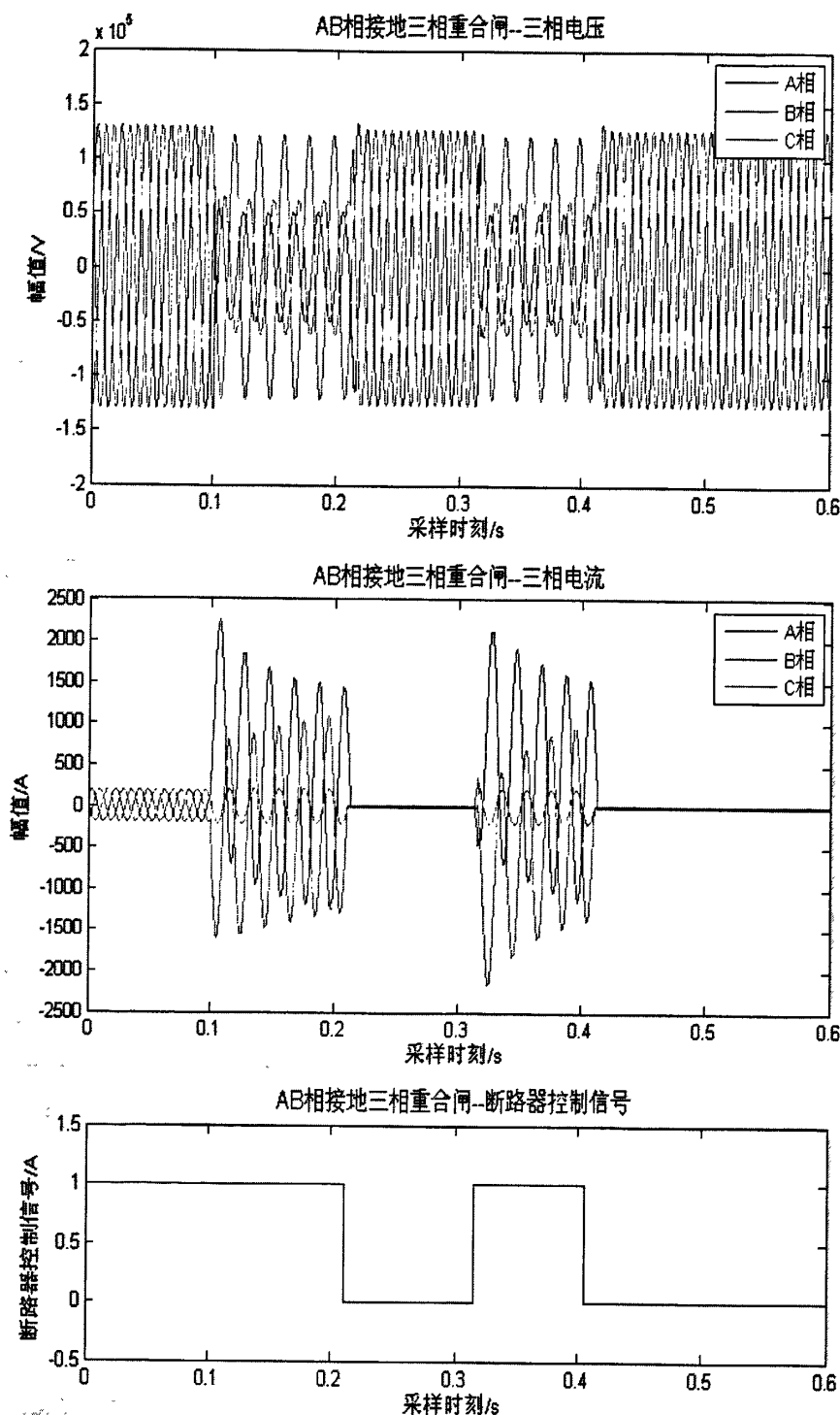


图 5-8 AB 相接地三相重合闸试验三相波形与断路器控制信号

(3) 三相接地三相重合闸试验

限时电流速断保护和故障时间同上，试验结果如图 5-9 所示，表明测试系统通信正常（时延 $\leq 200\mu\text{s}$ ），通信延迟满足测试要求，智能断路器控制单元能够实时控制断路器开合（时延 $\leq 100\mu\text{s}$ ）。

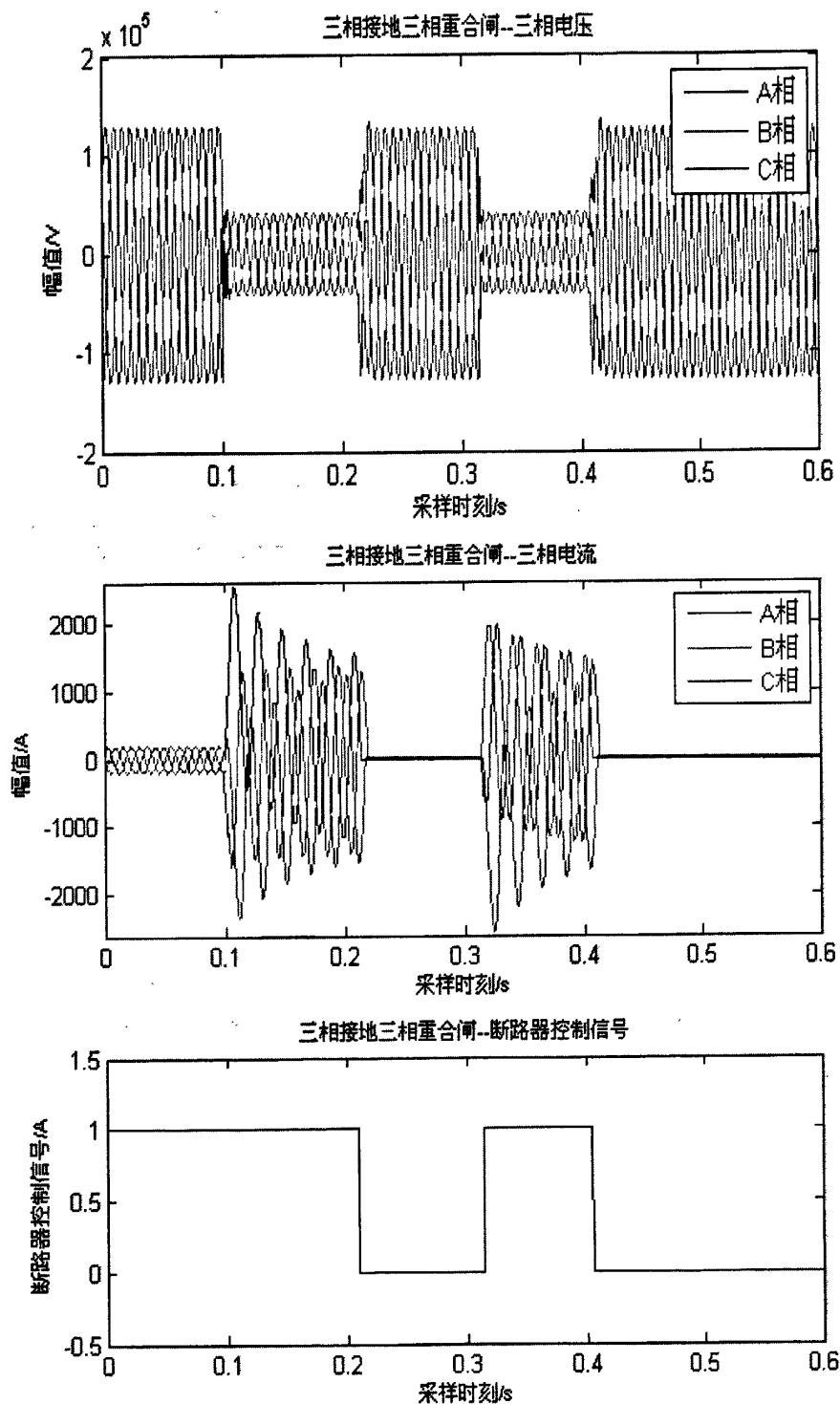


图 5-9 三相接地三相重合闸试验三相波形与断路器控制信号

在不同暂态情况下的多次试验表明本测试系统通信正常，实时仿真能够胜任实时闭环测试要求，通信延迟满足测试要求。

5.4 本章小结

本章主要讲述了所开发的数字继电保护测试系统功能和性能的检验过程和评价结果。在介绍了数字继电保护测试系统所应具有的功能和 IEC61850 对测试系统在通信方面的性能要求的基础上，利用所搭建的继电保护仿真模块对本系统进行了三方面的测试，包括合并单元性能测试、GOOSE 性能测试和整个系统的集成测试。

测试结果表明，本系统运行良好，能够为数字继电保护装置提供稳定可靠的实时闭环测试环境。

第六章 总结与展望

本论文在深入理解电力系统实时仿真和数字化变电站应用技术的基础上,研究了在 MATLAB 基础上实现实时数字仿真的方法,开发了基于实时数字仿真的数字保护测试系统,并完成了本测试系统的功能和性能的检验。

具体来说,论文主要做了以下三方面的工作:

1. 通过对数字化变电站过程层智能电子设备原理、功能及通信机制的研究和对 IEC 61850 标准的分析,掌握了数字化变电站过程层的基本应用技术。在此基础上,参考现有实时数字仿真系统的实现原理,利用 MATLAB/Simulink/xPC 双机实时仿真机制提出了电力系统实时数字仿真的解决方案,同时实现了基于 IEC 61850 的变电站过程层实时以太网通信,为研究数字化变电站相关技术和数字式保护功能测试提供了简便、有效的工具。

2. 基于上述实时仿真系统,开发了数字式继电保护测试系统:搭建了满足测试要求的典型测试系统;基于 MFC 和 MATLAB 引擎,开发了简洁、友好的图形用户界面,实现了装置的流程化测试;制订了使用本测试系统对数字继电保护装置进行功能和性能测试的流程。

3. 利用所搭建的继电保护仿真模块对本系统进行了三方面的测试,包括合并单元性能测试、GOOSE 性能测试和整个系统的集成测试。测试结果表明,本系统运行良好,实现了预期的功能并具有较好的性能,能够为数字继电保护装置提供稳定可靠的实时闭环测试环境。

数字化变电站技术的发展以及 IEC61850 标准的实施使得新型智能电子装置较传统装置在实现原理和软硬件方面都有了较大的变化,相应的对装置的测试也提出了很多新的要求。本文中实现的数字化保护测试系统能够完成保护装置测试的部分需求,但仍存在很多有待进一步解决和完善的地方,今后的努力方向包括:

1. 利用 scl 语言(变电站配置语言)实现测试系统模型参数的自动配置。IEC 61850 规定数字化变电站使用基于 xml 语言的变电站配置语言,这使得智能电子装置具有了自动描述功能。可以让测试系统读取被测装置的配置文件,自动设置故障时间、合并单元模块参数和智能断路器控制模块参数,加快测试的准备工作,同时减少手动设置可能出现的失误。

2. 实现装置的自动测试, 包括测试模板和报告模板的建立, 保护动作行为自动分析等, 提高测试的效率和准确度。

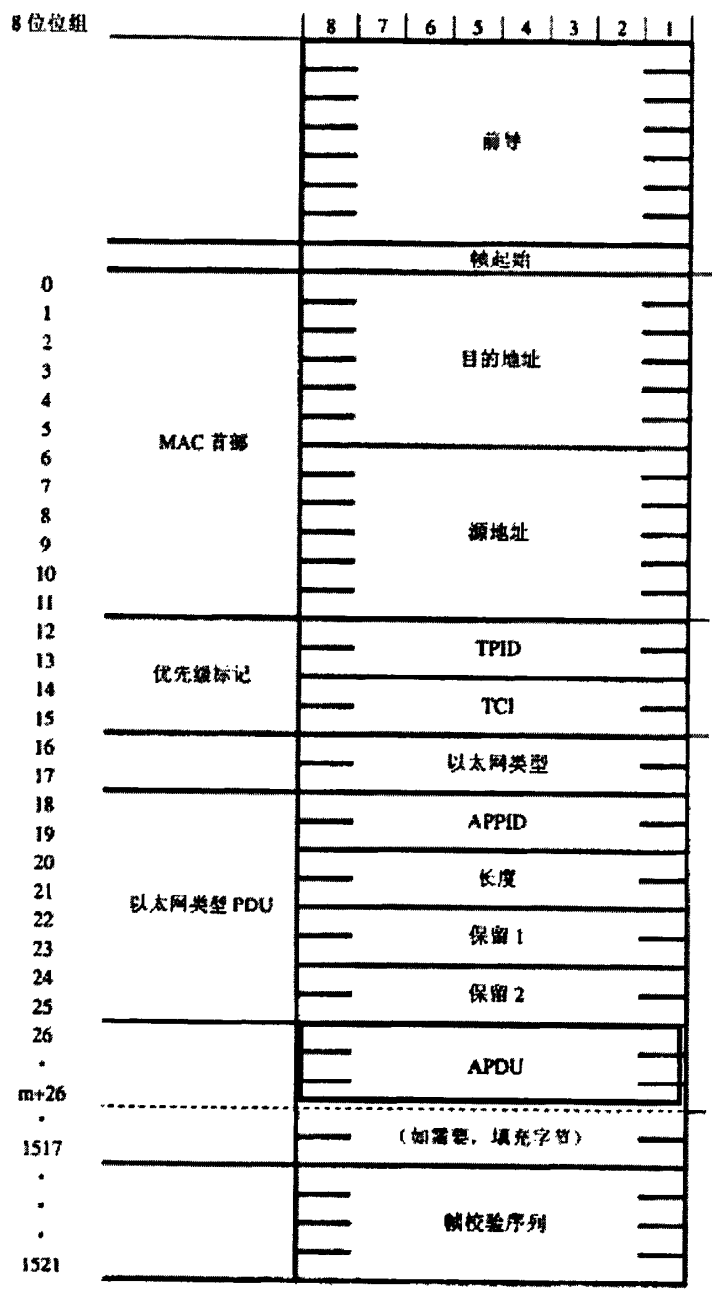
3. 增加对变电站通信网络可靠性和智能电子装置通信性能的测试。数字化变电站技术的推广给信息的传输和获取提供了很多便利, 但同时也使得站内设备过分依赖于通信网络, 网络的可靠性变得尤为重要。测试智能电子装置在网络可靠性变差(例如网络负载过重、网络风暴、网络断开)的情况下的功能和性能, 是一项很重要的工作。

4. 在仿真系统中增加对电子式/光电式互感器的仿真模块, 使得仿真更加符合现实。数字化变电站采用数字通信方式, 如果不考虑网络数据包丢失的情况, 通信过程中数据是没有误差的, 误差的产生仅在于互感器的 A/D 转换过程中。在仿真系统中加入互感器仿真模块, 建立互感器对数据精度的影响的数学模型, 可以使得仿真环境更加真实。

附录

附.1 ISO/IEC 8802-3 帧格式

帧格式如图附-1 所示



图附-1 ISO/IEC 8802-3数据链路层帧格式

附. 2 ASN. 1 编解码方法

报文的ASN.1编解码是采样值报文和GOOSE报文的组帧和解析工作的主要内容。根据IEC 61850标准,符合IEC 61850-9-1/9-2采样值报文和IEC 61850-8-1定义GOOSE报文均直接映射到数据链路层,数据帧格式是相同的(见附1),所不同的是APDU(应用协议数据单元)的内容:IEC 61850-9-1采样值报文的APDU格式是固定的,而且对每个数据项的类型和所占字节数均进行了定义,如图2-10所示;而IEC 61850-9-2采样值报文的APDU和GOOSE-APDU数据集是自定义的,即可以包含多个任意类型,任意字节长度的数据项。这决定了IEC 61850-9-1采样值报文APDU的ASN.1编码简单,只需将各数据项适当处理后排列为8位字节串即可;IEC 61850-9-2采样值报文APDU和GOOSE-APDU需要进行较为复杂的ASN.1编码。为了减少报文的编解码所需时间,以增强仿真的实时性,针对所采用的IEC 61850-9-2LE报文和具有固定格式数据集的GOOSE报文,论文编写了ASN.1编解码函数,供有关S函数模块调用。下面以9-2LE采样值报文为例予以介绍。

首先,定义了如下的采样值报文结构体和以太网信息结构体。

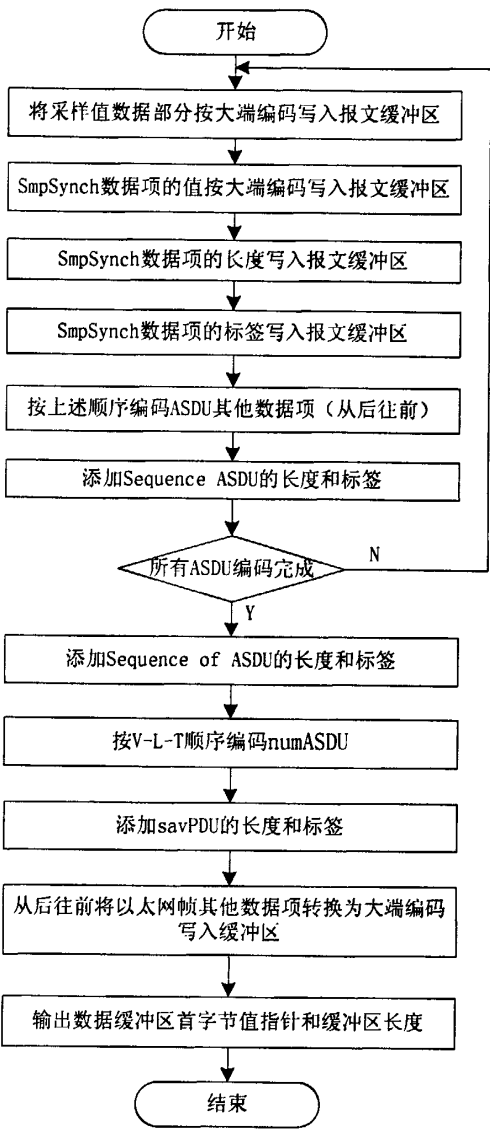
```
typedef struct
{
    ST_CHAR svID [MAX_SMPVAL_SVID_LEN+1];/* 采样控制块ID*/
    ST_UINT16 SmpCnt; /* 采样计数器*/
    ST_UINT32 ConfRev; /* 配置版本*/
    ST_BOOLEAN SmpSynch; /* 是否同步*/
    ST_UINT8 *SamplePtr; /* 指向采样数据的指针*/
    ST_INT SampleLen; /* 采样数据所占字节数*/
} SMPVAL_ASDU; /* 9-2LE数据帧的ASDU*/

typedef struct
{
    ST_UINT16 numASDU; /* 含有ASDU个数*/
    SMPVAL_ASDU *asduArray; /* ASDU序列*/
} SMPVAL_APDU; /* 9-2LE数据帧的APDU*/

typedef struct
{
    ST_UINT16 tci; /* 虚拟局域网标签控制信息 */
    ST_UINT16 etypeID; /* 以太网类型ID */
    ST_UINT16 appID; /* 应用程序ID */
} ETYPE_INFO; /* 需要用户填入的以太网信息*/
```

然后,分别编写了报文的ASN.1编码和解码函数,编码处理流程如图附-2。其中,编码过程从后往前进行,即按(sampleData-SmpSynch-...- svID)_{n↑}- numASDU-Reserved 2-Reserved 1-...-TCI的顺序进行,每个数据项按照Value-Length-Tag的顺

序依次写入报文缓冲区，Value部分需要进行大端编码的转化；反之，解码过程按从前往后的顺序进行，依次读取各数据项的标签和长度信息，根据长度找到存放该数据项值的所有字节，进项数据类型转换后，赋给采样值报文结构体和以太网信息结构体的相应变量。



图附-2 IEC 61850-9-2LE报文的编码过程

参考文献

- [1] 鲁国刚, 刘骥, 张长银. 变电站的数字化技术发展[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 499-504.
- [2] 高翔. 数字化变电站应用技术[M]. 中国电力出版社, 2008.
- [3] 高翔, 张沛超. 数字化变电站的主要特征和关键技术 [J]. 电网技术, 2006, 30(23): 67-71.
- [4] Mohamed Rayees. Substation Automation Techniques and Future Trends[C]. The 4th International Conference on Innovations in Information Technology, 18-20 Nov, 2007, 412-416.
- [5] 谭文恕. 变电站通信网络和系统协议 IEC61850 介绍[J]. 电网技术, 2001, 25(9): 8-11.
- [6] IEC 61850. 变电站通信网络和系统——第 7-1 部分: 变电站和馈线设备的基本通信结构原理和模型[S], 2003.
- [7] Apostolov A. Object Models of Protection Devices in IEC 61850[C]. Proceedings of 2005/2006 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, May 21-24, 2006, 915-920.
- [8] 郑三立, 梁旭, 孙刚等. 基于微机的电力系统数字动态实时仿真装置[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(1): 92-93.
- [9] 柳勇军, 梁旭, 闵勇等. 电力系统实时数字仿真技术[J]. 电力系统自动化, 2004, 37(4): 39-42.
- [10] 汤涌. 电力系统仿真技术的现状和发展[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(17): 66-70.
- [11] 张超, 廖碧莲. 继电保护测试技术现状及其发展[J]. 江西电力, 2006, 31(5): 4-10.
- [12] CIGRE Report, Evaluation of Characteristics and Performance of Power System Protection Relays and Protection System, SC 34- WG04, CIGRE, Paris, France, January 1985.
- [13] IEEE Power System Relaying Committee WG I16 Report, Understanding Microprocessor-based Technology Applied to Relaying, February 2004.
- [14] 赵志民, 秦立军, 刘世民, 肖仕武. 继电保护测试技术的现状与发展[J]. 现代电力, 2002, 19(1): 43-48.
- [15] 金明, 兰勇, 袁博强. 微机型继电保护测试装置的功能与现状[J]. 继电器, 2001, 29(3): 1-4.
- [16] 陈铸华. 多功能微机保护实验系统的新型继电保护测试装置研究[D]. 硕士学位论文. 长沙: 湖南大学. 2008. .
- [17] 陈皓. 新一代微机继电保护测试仪及其基本性能. 电力自动化设备[J]. 2002, 29(5): 61-63
- [18] 俞乾, 郑三立. 数字实时仿真在控制和保护系统测试中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2008, 20(6): 96-101.
- [19] 周孝信, 李若梅, 岳程燕. 电力系统全数字实时仿真装置—ADPSS[C]. 2004 年世界工程

师大会电力和能源分会场论文集, 中国.上海.2004: 328-333.

- [20] 冯硕, 黄梅, 李晓朋. 基于 IEC61850 的光数字继电保护测试仪的研制[J]. 继电器, 2008, 36 (8): 23-25, 45.
- [21] 杨韬, 向前. 基于 IEC 61850 协议的光数字继电保护测试仪的研制[C]. 中国国际供电会议 (CICED2006) .
- [22] 周健. 基于数字光电电气量测系统的数字保护测试仪的研究[D]. 硕士学位论文. 北京: 华北电力大学. 2006.
- [23] 冯小玲, 郭焱, 谭建成. 实时数字仿真系统(RTDS) 在继电保护上的应用研究[J]. 电网技术, 2005, 19 (4) :43247.
- [24] 马凯, 高厚磊, 邹贵彬等. 基于 IEC 61850 标准的数字化保护动模测试系统[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 133-141.
- [25] 马凯. 数字化保护动模测试系统的研究与开发[D]. 硕士学位论文. 济南: 山东大学. 2009.
- [26] 高广玲, 潘贞存, 高厚磊. 基于 IEC 61850 的实时数字仿真系统[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(14): 103-107.
- [27] 龚泉, 刘琳, 杨帆. 基于 IEC 61850 标准的数字化变电站系统测试[J]. 华东电力, 2009, 37(6): 0937-0939.
- [28] 徐天奇, 尹项根, 游大海等. 兼容 IEC61850 标准的智能电子设备测试[J]. 电力自动化设备, 2009, 39(3): 132-137.
- [29] APOSTOLOV A, VANDIVER B. Functional testing of IEC61850 based IEDs and systems [C] 2004 IEEE PES Power Systems Conference & Exposition. New York, USA: IEEE, 2004: 640-645.
- [30] APOSTOLOV A, VANDIVER B. Functional testing of IEC61850 based protection relays [C] The 60th Annual Conference for Protective Relay Engineers. [S.l.]: IEEE, 2007: 333-340.
- [31] 任雁铭, 秦立军, 杨奇逊. IEC 61850 通信协议体系介绍和分析[J]. 电力系统自动化, 2000, 24(8): 62-64.
- [32] 张结. IEC 61850 目标内涵分析[J]. 电网技术, 2004, 28(23): 76-80.
- [33] IEC 61850. 变电站通信网络和系统——第 7 部分: 变电站和馈线设备的基本通信结构[S], 2005.
- [34] IEC 61850. 变电站通信网络和系统——第 6 部分: 变电站自动化系统结构语言[S], 2007.
- [35] IEC 60044. 互感器——第 7 部分: 电子式电压互感器[S], 2007.
- [36] IEC 60044. 互感器——第 8 部分: 电子式电流互感器[S], 2007.
- [37] 邱红辉. 电子式互感器的关键技术及相关理论研究[D]. 博士学位论文. 大连: 大连理工大学. 2008.
- [38] Luciano A M, Savastano M. Wide band transformer based on a split-conductor current sensor

- and a Rogowski coil for high current measurement[C]. Instrumentation and Measurement Technology Conference, IEEE, 24-26 April 1995, 454-457.
- [39] 罗苏南, 叶妙元, 徐雁. 光纤电压互感器稳定性的分析[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(12): 15-16.
- [40] 李红斌, 余春雨, 叶国雄, 等. 电子式互感器数字输出的研究[J]. 高电压技术, 2004, 30(2): 10-11.
- [41] IEC 61850. 变电站通信网络和系统——第 9-1 部分: 特殊服务映射(SCSM)——映射到单向多点对电串行连接[S], 2006.
- [42] 窦晓波, 吴在军, 胡敏强, 等. IEC 61850 标准下合并单元的信息模型与映射实现[J]. 电网技术, 2006, 30(2): 80-86.
- [43] 梁晓兵, 周捷, 杨永标等. 基于 IEC 61850 的新型合并单元研制[J]. 电力系统自动化. 2007, 31(7): 85-89.
- [44] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊等. 一种遵循 IEC 61850 标准的合并单元同步的实现新方法[J]. 电力系统自动化. 2004, 28(11): 57-61.
- [45] IEC 61850. 变电站通信网络和系统——第 9-2 部分: 特殊服务映射(SCSM)——映射到 ISO/IEC 8802-3 的采样值[S], 2006.
- [46] 曹津平, 李伟, 秦应力, 等. 数字化变电站过程层的通信技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2008, 36(12): 60-63.
- [47] 殷志良. 基于 IEC 61850 的变电站过程总线通信的研究[D]. 博士学位论文. 北京: 华北电力大学. 2005.
- [48] 殷志良, 刘万顺, 秦应力. 基于 IEC 61850 标准的采样值传输模型构建及映射实现[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(21): 38-42.
- [49] 殷志良, 刘万顺, 杨奇逊, 等. 基于 IEC 61850 的通用变电站事件模型[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(19): 45-50.
- [50] IEC 61850. 变电站通信网络和系统——第 8-1 部分: 特殊服务映射 (SCSM) ——映射到制造报文规范 (MMS) [S], 2007.
- [51] 贺振华, 胡少强. IEC 61850 标准下通用变电站事件模型与采样值传输模型的对比[J]. 继电器, 2008, 36(1): 80-83.
- [52] MATLAB User's Guide[M]. The Math Works Inc, 2009.
- [53] 李颖, 朱伯立, 张威. Simulink 动态系统建模与仿真基础[M]. 西安电子科技大学出版社, 2004.
- [54] 王晶, 翁国庆, 张有兵. 电力系统的 MATLAB/SIMULINK 仿真及应用[M]. 西安电子科技大学出版社, 2008.
- [55] 飞思科技产品研发中心. Matlab 6.5 应用接口编程[M]. 电子工业出版社, 2003

- [56] 薛定宇等. 基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用[M]清华大学出版社, 2002
- [57] MATLAB xPC Target User's Guide[M]. The MathWorks, Inc. 2009
- [58] 胡琳静, 孙政顺[J]. SIMULINK 中自定义模块的创建与封装[J]. 系统仿真学报, 2004, 16(3): 488-491.
- [59] 宋丽群. 微机型保护测试装置与测试技术[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2006, 4(1): 33-38.
- [60] 朱忠亭, 张沛超, 汪可友. 基于自动测试的继电保护测试软件研究 [J]. 继电器, 2004, 32(17): 31-33, 42.
- [61] 姚致清. 继电保护测试发展方向的思考[J]. 继电器, 2008, 36(11): 76-78.
- [62] xPC Target supported Ethernet chipset list[M]. The MathWorks, Inc. 2009
- [63] DL/T 871-2004 电力系统继电保护动模试验[S], 中华人民共和国发展和改革委员会, 2004.
- [64] RDL-01 型继电保护数字实验室技术说明书[M], 北京博电新力电力系统仪器有限公司.
- [65] 潘爱民. Visual C++.NET 技术内幕(第六版) [M]. 清华大学出版社, 2004.
- [66] 郭红, 蒋云飞. VC++与 MATLAB 混合编程技术研究[J]. 计算机工程, 2002, 28(9): 269-271.
- [67] IEC 61850. 变电站通信网络和系统——第 5 部分: 功能的通信要求和装置模型[S], 2006.
- [68] IEC 61850. 变电站通信网络和系统——第 10 部分: 一致性测试[S], 2006.
- [69] 周森, 黄立场, 李九虎, 等. 对支持 IEC-61850 标准的继电保护测试方法的思考[C]. 第十一届全国保护和控制学术研讨会, 2007, 405-410.
- [70] 徐立子. IEC 61850 对变电站自动化系统报文性能的要求[J]. 电网技术, 2002, 26(11): 1-3, 19.
- [71] Skeie T, Johannedden S, Brunner C. Ethernet in Substation Automation[J]. IEEE Control System Magazine, 2002, 22 (3): 43-51.
- [72] 郑新才, 周鑫, 王素华等. 数字化变电站的 GOOSE 网络测试[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(24): 85-89, 93.
- [73] 杨永标. 基于 IEC 61850 标准的合并单元性能测试[J]. 电网技术, 2006, 30(增刊): 442-445.
- [74] DL/T 1146-2009. DL/T860 实施技术规范[S], 中华人民共和国国家能源局, 2009.

致 谢

本文是在我的导师梁军教授的悉心指导下完成的。三年来的求学生涯里，导师对我的学业倾注了大量心血，各项工作在梁老师的悉心指导和关怀下得以顺利进行。梁老师一直都给予我悉心的指导和无私的关怀，无论是在学习上还是在生活上都给予我很多帮助，并为我们提供了良好的科研环境。梁老师高尚的品德、严谨的治学态度和务实的工作作风时时刻刻影响着我，并将使我受益终生。在此，谨向导师表达最真挚的敬意和感谢！

在课题研究和论文撰写过程中，张利老师、车仁飞老师和负志皓老师给予了极大的帮助，并提出了许多宝贵的意见，在此表示感谢。

同时感谢在我求学期间所有关心帮助过我的老师和同学们。

最后，特别要感谢我的父母，他们对我的培养、关爱和全力支持，为我解除后顾之忧，使我能顺利完成学业。

冯善强

二〇一〇年四月 于济南

攻读学位期间发表的学术论文

冯善强, 梁军. 基于 xPC 目标的虚拟合并单元的构建. 第 25 届电力系统自动化年会, 2009.

学位论文评阅及答辩情况表

论文评阅人	姓 名		专业技术 职 务	是否博导 (硕导)	所 在 单 位		总体评价 ※
	任志刚		高工	否	山东电力集团		A
	王振树		副教授	是	山东大学		A
答辩委员会成员	姓 名		专业技术 职 务	是否博导 (硕导)	所 在 单 位		
	主席	任志刚	高工	否	山东电力集团		
	委 员	张波	教授	是	山东大学		
		栾兆文	教授	是	山东大学		
		王振树	副教授	是	山东大学		
		王勇	副教授	否	山东大学		
答辩委员会对论文的 总体评价※			A	答辩秘书	王勇	答辩日期	2010.5.23
备注							

※优秀为“A”；良好为“B”；合格为“C”；不合格为“D”。

