

清华大学

# 综合论文训练

题目：电力物联网广域控制仿真平台  
的搭建与性能分析

系别：信息学院自动化系

专业：自动化专业

姓名：夏艾萱

指导教师：曹军威研究员

2012 年 6 月 7 日



# 关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：学校有权保留学位论文的复印件，允许该论文被查阅和借阅；学校可以公布该论文的全部或部分内容，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存该论文。

(涉密的学位论文在解密后应遵守此规定)

签 名：\_\_\_\_\_ 导师签名：\_\_\_\_\_ 日 期：\_\_\_\_\_



## 中文摘要

本项目以国家 973 项目《物联网基础理论和设计方法研究》为背景。物联网技术作为信息领域中的第三次革命，其发展在目前并不完善，其中最为重要的两点即为信息保真性问题以及执行忠实度问题，因此受到了众多研究人员，乃至社会的关注。

电力物联网（即智能电网）中的广域控制为是物联网应用的典型代表之一，在系统组成，规模，以及传感通信等方面的代表性都很强，因此研究结果普适性较好。本项目以其为研究对象，对该系统进行建模和平台搭建工作，预备后期用仿真平台来研究广域控制中如何提高信息保真性和执行忠实度的难题。

本文的关注点在该仿真平台的建立，以及对其控制效果的初步探讨，主要完成了以下工作：

1. 设计并搭建了以三大模块（电网，通信，控制）为基础构成的电力物联网广域控制仿真平台，可用于研究各种电网以及通讯网内的各种指标对智能电网系统稳定性调控的影响；
2. 控制器网络通信模块与控制器模块之间数据接口的设计及实现，可以用于研究多通道异步时延对广域多地区相连供电系统的影响；
3. 广域多地区相连供电系统中多通道时延的同步性和实时性问题的研究探讨。

**关键词：**物联网；智能电网；广域控制；时延处理；仿真平台





## ABSTRACT

This project is based on a national 973 program "Basic theory and modeler method of Internet of Thing". As the third revolution in Information Technology, it still has many problems in practical issues, thus draw many researchers and society's attention on it. The information fidelity and the executive loyalty are two most important problems among them.

As a typical application of Internet of Thing, the research result in smart grid could be used in many related fields due to its' large-scale system and the communication and sensor network. Our project is focus on the wide area control in smart grid, aiming to establish the simulation platform of this system. And such platform could be used in latter research work, such as how to improve the information fidelity and executive loyalty in wide area control.

This report focus on the implement of the simulation platform, and also some discuss on the effect of the wide area controller. The work in this report could be concluded into three points.

1. Design and establish the platform of Smart Grid wide area control, which is composed by power grid, communication system, and controller these three module. And this platform could be used to study other parameters in smart grid's control;
2. Design and implement the data interface between the controller and communication module, and this part could be used to study the impact of delay in multiple channels to the multi-region connected power system;
3. The compare about the synchronization and real-time performance of signals in the multi-channel wide area control in power system.

**Key words:** Internet of Thing; Smart Grid; Wide Area Control; delay;Simulation Platform





# 目 录

<b>第 1 章绪论</b> .....	<b>1</b>
1.1 引言 .....	1
1.1.1 物联网研究背景.....	1
1.1.2 项目研究背景.....	2
1.1.3 文章结构及内容安排.....	3
1.2 智能电网信息体系架构 .....	4
1.2.1 智能电网简介.....	4
1.2.2 智能电网信息系统架构.....	5
1.3 工程项目背景 .....	11
<b>第 2 章电力物联网广域控制的仿真平台的设计</b> .....	<b>13</b>
2.1 电力物联网广域控制仿真平台背景 .....	13
2.2 仿真平台模块设计 .....	15
2.2.1 电网端模型.....	16
2.2.2 通讯网端模型.....	17
2.2.3 控制器模型.....	17
<b>第 3 章实验平台初步搭建</b> .....	<b>18</b>
3.1 电网端仿真模块 .....	19
3.1.1 大电网仿真软件介绍.....	19
3.1.2 电网频率调节.....	21
3.2 通讯网端模型仿真 .....	24
3.2.1 网络模型.....	24
3.2.2 流量模型.....	24
3.2.3 网络时延实现.....	26
3.3 控制器初步模型及仿真程序 .....	27
3.3.1 控制器的显示界面.....	27
3.3.2 弱阻尼低频振荡控制器.....	32
3.4 实验目的有效性验证 .....	33
3.4.1 广域控制有效性验证.....	34

3.4.2 多路时延对控制效果的影响.....	35
3.4.3 初步结论.....	37
<b>第 4 章控制决策层数据接口的设计与实现.....</b>	<b>38</b>
4.1 相关研究.....	38
4.2 时延处理策略设计.....	39
4.2.1 同步处理策略.....	39
4.2.2 实时处理策略.....	40
<b>第 5 章实验结果及分析.....</b>	<b>42</b>
5.1 实验设计及原始数据采集.....	42
5.1.2 实验流程.....	42
5.2 实验数据分析与对比.....	45
5.2.1 无同步自身对比.....	45
5.2.2 有同步自身对比.....	46
5.2.3 整体对比.....	47
5.3 实验初步结论.....	47
<b>第 6 章总结与展望.....</b>	<b>49</b>
6.1 工作总结.....	49
6.2 展望.....	49
<b>插图索引.....</b>	<b>50</b>
<b>参考文献.....</b>	<b>54</b>
致谢.....	56
声明.....	58
<b>附录 A 书面翻译.....</b>	<b>60</b>

# 第 1 章 绪论

## 1.1 引言

### 1.1.1 物联网研究背景

随着互联网技术的长足发展，以及全球信息化脚步的推进，物联网技术的提出成为了继 WWW，以及移动互联网技术之后的世界信息领域中的第三次革命性进步。物联网是现实与虚拟网络之间进行实时交互的系统，是一种在互联网基础上进行拓展的应用，且可以与多种公共网络相连接，如电信网，广域电网等。从物理角度的定义上来看，物联网(Internet of Things)技术是指，将射频识别器(RFID)，红外感应器，激光扫描等各类信息传感设备与互联网相连接，从而形成的将物理设备与 IT 基础设施相连接的巨大网络。其基本目的是通过这种方法实现智能化的识别和管理。而从使用角度来看，国际电信联盟 (ITU) 对物联网的定义则是，物联网实现了物物，人物，以及人人的互连。

物联网的概念自 1999 年由麻省理工学院的教授提出后，即受到了各界的重视，认为其关系到未来信息资源的掌控；而在 1999 年 IBM 提出“Smart Planet”的概念后，以智能服务和管理的物联网的技术发展则迅速被美国，日本，中国，欧盟等多个国家地区指定为重大信息发展战略之一。

物联网在实际生活中的用途十分广泛，包括是能交通，智能家居，环境实时监控，航空航天等多方面。但由于在实现过程中遇到的各种各样的困难，物联网的实际的发展状况仍然停留在实验阶段，并没有真正应用到日常生活中。我国在物联网建设中遇到的主要问题主要为：缺少统一的管理标准统，以及缺少完善的通信以及智能终端中的核心技术。

物联网系统在运行中，会涉及一组包括物理状态感知，信息传输，分析决策等环节在内的关键过程。因此，物联网系统进行决策支和控制功能的有效性很大程度上取决于从物理状态感知和控制执行这两个环节的运行效果。因此，物联网应用当前在技术上的不成熟的表现可以归结为：信息保真性问题，以及执行忠实度[9]两大核心问题。其中，信息保真性问题是指出如何确保从真实的物理系统中获得能够正确反映当前物理系统的客观状态值，并将其作为控制或管理的输入值的

问题；而执行中忠实度问题则是指如何使得物联网系统的执行过程及结果满足期望，得到良好的运行结果。

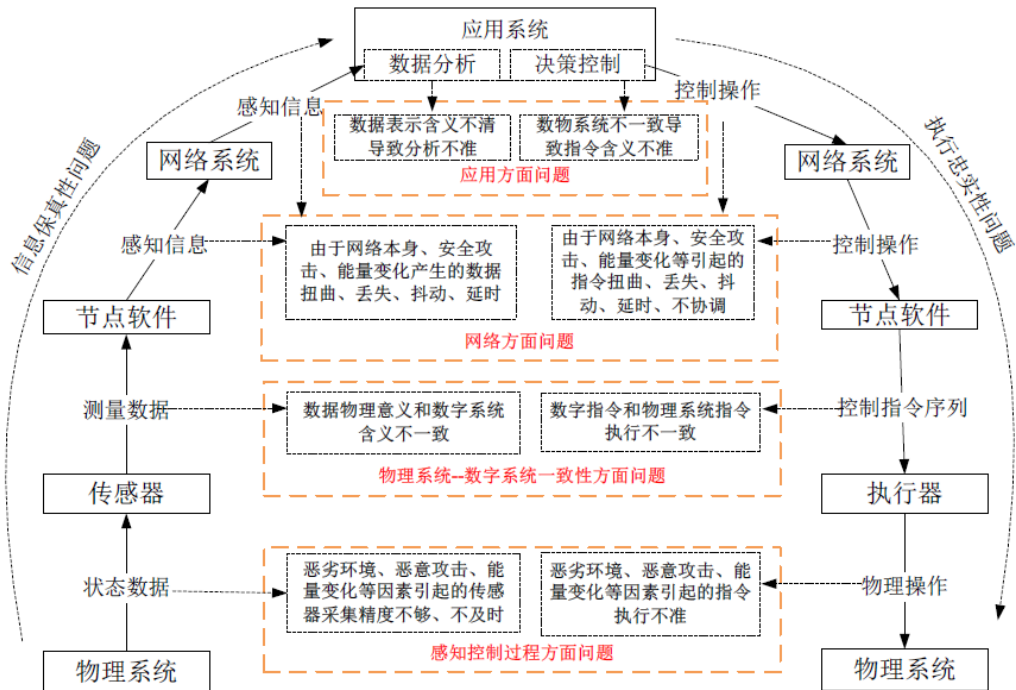


图 1.1 信息保真及执行忠实问题分析

如图 1.1 中所示，物联网的信息保真性以及执行忠实度问题受到多方面的影响，主要包括应用系统中指令和数据含义不清，网络系统中的信息安全及时延问题，数字和物理系统一致性问题，以及感知控制过程中多种因素导致的执行和采集精度不够这四大方面的问题[9]。

### 1.1.2 项目研究背景

在本课题中，我们使用电力物联网为研究对象，试图用控制的方法改善在通过电力物联网进行广域控制时，由于信息保真性不够导致的执行效果不能到达期望值的问题。采用电力物联网为物联网技术的实例化对象的主要原因有如下两点。

第一，能源建设毫无疑问是我国的基础经济建设，且随着近年来经济的飞速发展，我国的用电量水平也在急速增加，因此国民经济稳定发展的基本保证即是大规模的电源以及电网的建设[9]。同时，由于我国的能源分布并不匹配，存在很多大规模远距离电力输送的系统，因此对电力系统稳定性控制的要求也越来越

高。

此外，电力物联网（即智能电网）是物联网的重要应用分支之一。其应用规模，系统构成以及信息感知等方面层次明显，均可以作为一个完整物联网系统的典型代表。因此，从本项目中得到的理论研究成果也能够充分反映其他物联网应用系统中的类似特点。

智能电网体系结构将在下一节中给出详细介绍。

### 1.1.3 文章结构及内容安排

本文介绍了电力物联网中广域控制仿真实验平台的搭建，其目的为了验证电力物联网中广域控制的效果，并寻找方法解决由在广域闭环调控中通信网络时延导致的信息保真性以及执行忠实性问题。

第一章是引言及项目背景介绍。首先大体介绍了物联网的整体概念及发展历程，并点出了我国目前在发展物联网应用中所遇到的问题，以及本项目的简单背景介绍及目的。然后着重介绍了智能电网的体系架构，以及本项目的详细项目背景。

第二章介绍了电力物联网广域控制仿真平台项目的具体背景与应用，以及平台各个模块的整体设计思路。

第三章中分别说明了各个模块的具体功能，使用流程以及搭建方法，并介绍了利用初步搭建的系统仿真平台对实验目的有效性的验证与初步结论。

第四章中则着重介绍了控制器模块与电网通讯模块之间的接口以及数据协议，是整个平台的创新点所在。

第五章中对已有的实验结果进行分析，并得出初步结论。

## 1.2 智能电网信息体系架构

### 1.2.1 智能电网简介

智能电网是能够对用电发电设备以及用户的用电情况进行实时监控的系统[1]。该系统能够通过各种收集处理实时信息从而提供完整的电网当前运行状态值，方便进行系统管理及维护工作，以提高电网整体的稳定性水平。传统电力系统以及智能电力系统的对比框图如图 1.1 所示。可以看出，智能电网在传统电网的基础上加入了与用电侧互动，以及从整体上进行实时智能调度的功能。

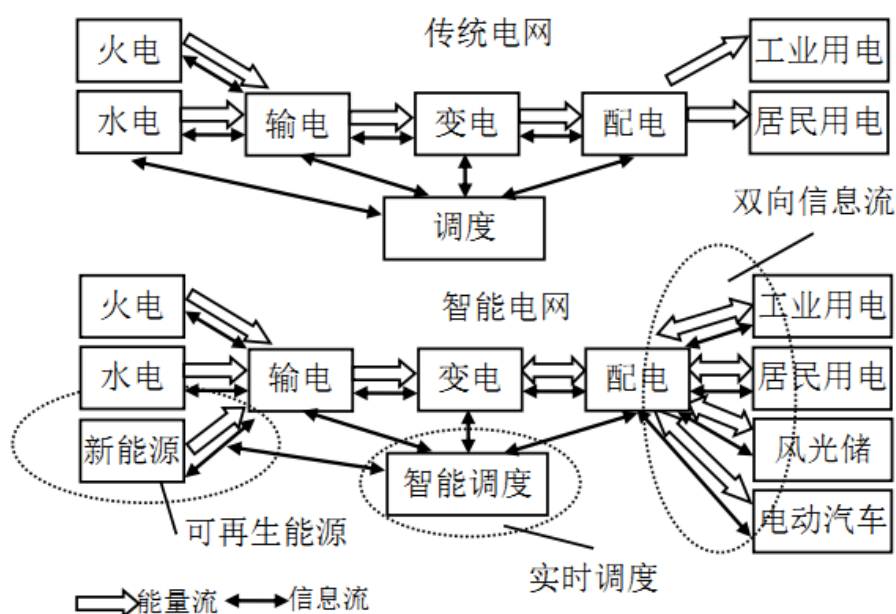


图 1.2 传统电网及智能电网框图

与智能电网相比，传统电网主要有四大问题。首先，在长距离的电力传送中，遇到故障时无法获得故障点的准确信息；其次，电力系统中的一些重要参数的不客观时变性等特点导致了无法对电力系统预测以及调度；同时，由于采用保守的输电方式应对输电极限未知的问题，导致了输电线路的利用率过低。传统电网中的这些问题基本都是因为系统中没有能够进行信息交换的健全的信息网络，而这也是智能电网系统中希望能够着重解决的问题。

我国的电力系统结构复杂，资源分配不均，且能源结构多样。因此自 2006 年 IBM 公司提出了智能电网的概念以及相应的解决方案后，我国对相关领域的发展十分重视，并与 2009 年 5 月提出了根据我国独特的环境及资源情况，建设具

有特色的“坚强智能电网”的发展规划。由国家电网公司定义的我国未来期望建设的“坚强智能电网”的八大特征[2]如下：

- 强大的资源优化配置能力；
- 良好的安全稳定运行能力；
- 能够促进清洁能源的发展；
- 高度智能化的调度；
- 为新型电力用户提供满意的服务；
- 实现管理信息化；
- 提高用户与电网系统交互性；

### 1.2.2 智能电网信息系统架构

智能电网的信息系统是区别传统电网与智能电网的重要环节之一，也是如今人们研究热点之一。其体系架构可归纳如图 1.2 所示：

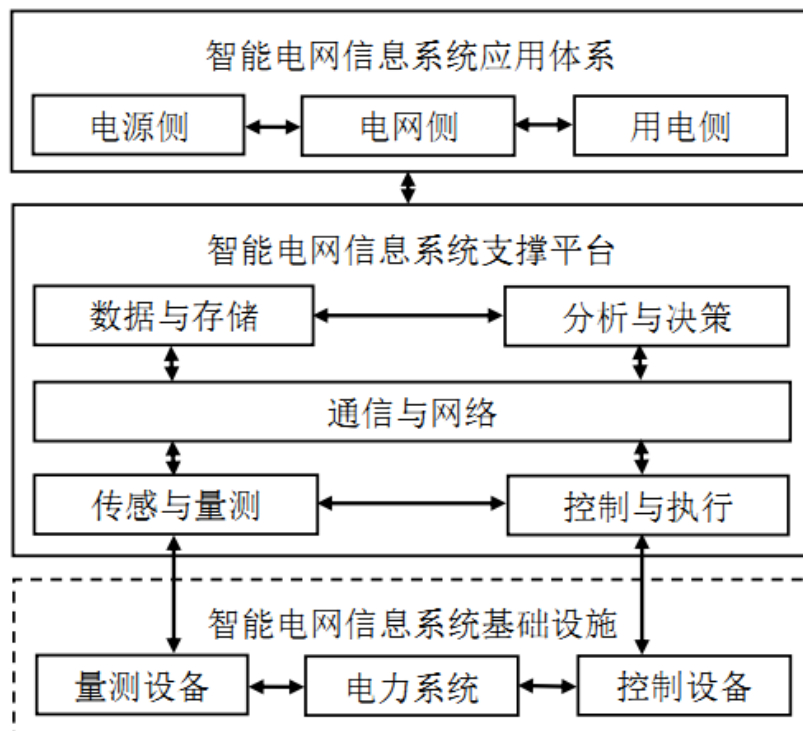


图 1.3 智能电网信息体系架构示意图

由上图可以看出，智能电网的信息系统主要由基础设施，信息系统支撑平台以及上层应用系统三大部分组成。



- **基础设施系统:**

智能电网的底层基础设施系统主要由量测设备，控制设备以及底层电力系统构成。

- (1) 量测设备**

智能电网信息系统的实现依赖于量测系统中传感器的应用[3]。

目前智能电网中常用的电网运行维护量测系统为数据采集与监视控制系统(Supervisory Control And Data Acquisition, SCADA), 以及广域测量系统(Wide Area Measurement System, WAMS), 其对应的底层传感设备分别为 RTU(远程终端装置, Remote Terminal Unit) 单元和 PMU(精密测量单元, Precision Measurement Unit) 单元。目前实际应用较多且发展最为成熟的是 SCADA 系统, 该系统能够对设备的运行进行监控, 并实现数据采集, 设备运行控制及测量等功能, 在电力行业中经常用到的能量管理系统(EMS)就以该系统作为底层进行数据收集处理的子系统; WAMS 系统能够检测到电网的实时动态过程, 虽然该系统目前的应用并不广泛, 但其是当前研究重点, 该系统不仅具有 SCADA 系统的功能, 还增加了故障录波的能力, 且其前端的测量装备 PMU 的量测频率和精度也更为出色。

除此之外, 智能电网中的量测设备还包括个人用户量测系统, 其应用的量测设备为智能电表, 多用于测量个人或家庭用电情况。

- (2) 控制设备**

电网系统中所用到的控制设备主要为各类智能电子终端设备, 以及之前所提到过的 RTU 单元(远程终端装置)。其控制的目的是使得底层电力系统的工作参数正常, 底层电力系统的组成将在下面提到。电力系统的工作参数主要包括电压, 相位, 有功及无功功率以及频率等。

### (3) 底层电力系统

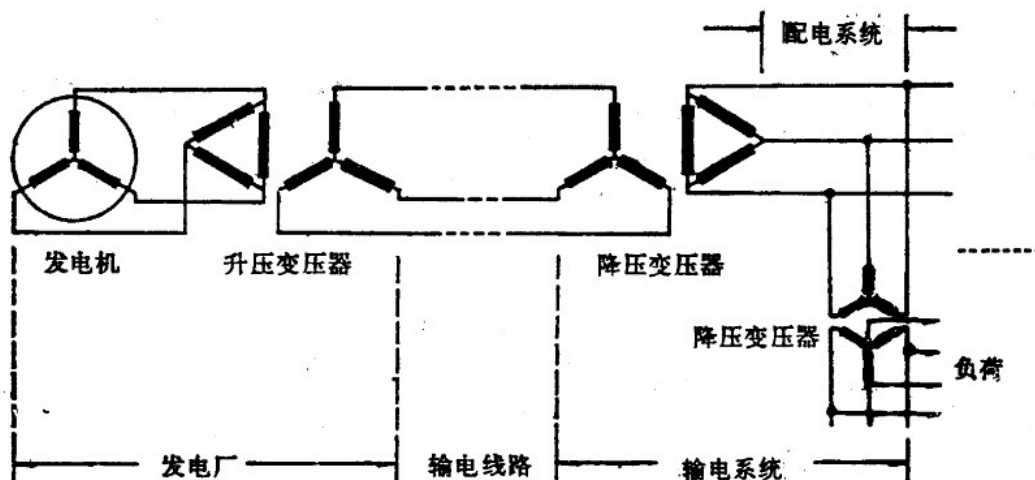


图 1.4 电力系统基本机构图

图 1.3 为一个完整的简单电力系统的组成图，其中包括了发电，输配电，和负荷三大子系统。在智能电网中对电力系统的运行情况进行预测时则需要对底层电力系统进行建模。而在这三大子系统中负荷建模则是较为困难的一部分，也是当前研究的重点所在：只有负荷模型建立准确后才能更好地对系统测量值进行修正，使得在系统遇到故障点时能够快速恢复稳定状态。

#### ● 信息系统支撑平台：

由图 1.2 我们可以看出智能电网的信息系统支撑平台可主要分为传感测量，网络通信，数据存储，分析执行这四大模块。下面将依次对这四大模块进行简要说明。

#### (1) 传感测量

正如上文中提到的，目下实际电力系统中存在两套量测系统：基于 RTU 的 SCADA 系统以及基于 PMU 的 WAMS 系统。

其中目前 SCADA 系统的应用较为广泛，其量测单元 RTU 不仅具有量测和通信功能，同时还具有控制功能，能够执行系统返回的命令，因此同时也作为控制单元的一部分。虽然 RTU 单元的功能很强大，但是单纯作为测量单元来看，其数据采样频率较低，因此不能够及时取得电力系统中的动态信息；且 RTU 单元中并没有设置同步时钟，因此其获取到的数据并不同步，在多通道的电力系统中对控制效果影响较大。综上所述，虽然 SCADA 系统的功能很强大，但由于其量测单元 RTU 性能的限制，该系统并不能够反应电力系统的即时状态，对于对实时性要

求很高的智能电网来说，这是较为不利的一点。

另一套此量测系统 WAMS 系统的应用比不如 SCADA 系统广泛，但其采样频率高，测量更为精确（增加了相角量的测量）的特点很好地吻合了智能电网对数据实时性和准确性的要求。因此虽然目前其应用并不广泛，但是针对该系统的科研试验越来越多，且各国的智能电网项目中都已经开始增加 WAMS 系统的使用 [4]，并有用该系统取代传统 SCADA 系统的趋势。

## (2) 网络通信

网络通讯系统是整个智能电网系统中十分重要的环节，在 1.1 节末尾所提到的电力系统的信息保真性问题以及实行忠实度问题都与其不无联系。通信网络的基本构架图如图 1.5 所示。

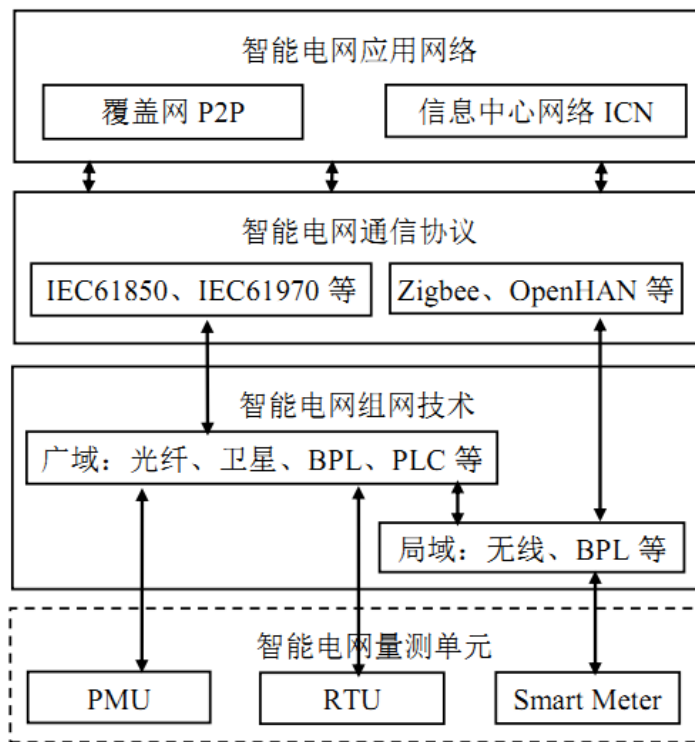


图 1.5 通信网络的基本构架图

针对上述两个问题来讲，通信网中对其影响最大的两个指标即为网络中的延时情况以及网络稳定性问题。由于智能电网系统中加入了智能调度，实时控制的模块，因此对数据的同步性要求很高；同时，电力系统的控制调度应归于动态调度范畴，并没有明确的任务周期存在，且需要满足电力系统的控制任务对时间的约束条件，这样才能够提高智能电网调度的可靠性。因此，专门针对该系统的通

信网络系统的构建方案一直是业内人士研究的重点对象之一。

不少研究文献，如文献[5]中提出为智能电网系统建立基于 TCP/IP 协议专门的通信模型，并研究了在存在背景噪声以及网络排队机制之后的时延以及丢包等现象。目前我国所采用的就是为智能电网建立专有网络的模式，但是该方法成本较高，因此仅用于 220kV 以上电压等级的输电线路中。因此，如何在使用公共网络的模式下确保智能电网信息系统的数据实时性也是我国研究人员们所面对的难题之一。

### (3) 数据存储

因为智能电网系统对数据的实时性要求很高，从而需要具有高性能的海量数据存储系统支持。

目前的电网公司大多采用购置大型服务器的方法应对智能电网系统对实时数据的要求，而使用大型磁盘阵列和数据库管理软件进行数据存储处理的费用很昂贵，且整体系统的可扩展性较差。

从该角度出发，智能电网系统的实现同物联网系统一样依赖于云计算平台提供的存储乃至计算资源，这也是目前的研究热点之一，文献[7]中即介绍了利用开源的分布式文件系统 Hadoop 进行状态监测数据处理平台搭建的实现方法，既通过冗余存储的方式保证了系统中数据的可靠性，也使得系统的性价比和可扩展性更高。

### (4) 决策执行

决策执行模块可以认为是智能电网中的核心模块，需要对上传的海量数据进行整理分析，从而满足各终端用户与电网系统的交互需求，以及电网控制系统对于电网稳定性的控制需求。其示意图如图 1.6 中所示。

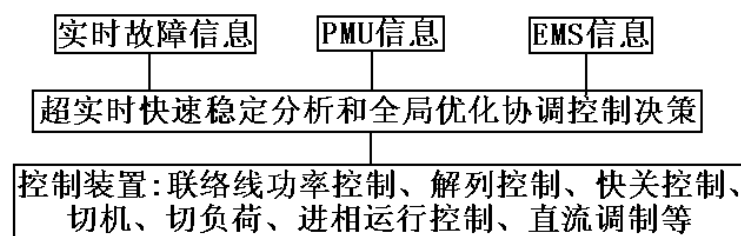


图 1.6 智能电网决策执行模块示意图

目下智能电网中的海量数据处理决策应用主要有两大趋势。一是能够保证大电网系统运行稳定性的运行监控系统，其能够通过进行动态安全评估（dynamic security assessment, DSA）来控稳或帮助系统恢复稳定状态；二是面向客户的智能消费系统[13]，利用数学模型仿真，Lyapunov 稳定判据，模式识别等方式[14]优化用户消费，且多与新能源入网（风能，太阳能等）相结合。

- **上层应用系统：**

智能电网的上网应用可以分为电源，电网，和用电侧三大部分。目前受到关注较多的为是后两者。

电网侧应用主要包括大电网智能规划调度，以及电网广域监控两大部分。智能规划调度中有代表性的是能量管理系统（Energy Management System, EMS），该系统有一套完善的数据监测，收集以及处理体系，并且能够通过输电网上的实时数据做负荷预测，负荷建模等工作，使得工作人员对电网状态的处理更为快捷准确。

用电侧应用主要是指用电需求侧管理（Demand Side Management, DSM），其目的是通过诱导用户用电方式来实现削峰填谷，错峰等目的，从而平稳电网负荷，减轻供电系统高峰时段的供电压力，提高非高峰时段的利用率。

而大电网的广域监控则是本文所研究项目的重点。目前我国电力系统在进行电网的广域监控工作时，常用做法是根据离线稳定控制策略表实施控制[15]。但这种离线的控制方案没有自适应能力，且计算量较大，更新维护较为不便。大电网的实时广域监控系统则可以通过手机实时数据对大电网进行实时控制，从而维护大电网的安全稳定运行。该方法的原理并不复杂，但在具体应用中遇到的问题依然很多，本项目中所关注的网络通道异步时延也是其中之一。

### 1.3 工程项目背景

本项目是基于国家 973 项目《物联网基础理论和设计方法研究》下，针对软件职称评调和应用实例研究子项目中，以电力物联网为典型实例[9]的应用实例验证项目。

作为一个复杂的大型系统，广域电网系统的研究是较为困难的，因为其会受到多种子网络和外来的不确定性的影响，如用户，硬件网络等。因此并不能采用解决传统问题的固定方法和思维来解决电力物联网中的遇到的保真和忠实度问题，需要扩宽思路，从新技术入手来重新思考解决方案。在电力物联网中需要解决的主要问题归纳如下：

- 电力物联网中海量实时数据的传输与存储；
- 电力物联网的数据分析和决策行为（变参数，约束，多时间维度）；
- 电力物联网中的分层控制技术。

本课题的原型系统为中国南方电网下属的某广域电网系统。南方电网由广东、广西、贵州、云南、海南五省（区）电网及南方公司直属电网组成[16]，并通过广东电网与港澳电网相连，2010 年电网结构简图如图 1.7 所示。



图 1.7 2010 年南方电网地理界线示意图

我国东西部的经济发展水平和能源分布水平并不相匹配，故而“西电东送”等平衡资源配置的项目应运而生。而南方电网公司的五省相连的大型广域电力系统的即为这类项目中较为典型的一个。此外，南方电网在五省相连的系统中使用了交直流并联输电，这种方式所输送的潮流较重，且稳定性不如直流输电的方式好，因此对该系统进行控制稳定性的研究对日后的进一步发展有较高的价值。

在本项目的研究中，我们将抽取该系统中的一小块系统进行广域控制的仿真，在选中的系统中进行多通道的仿真实验。在所研究的问题中，广域控制系统的受控对象物理跨度大。多路信号的时延不仅是随机的，而且相互不同，这样导致了多路信号到达不同步、时序颠倒情况的出现。这样，在接收控制信号的处理中，等待同步、调整时序将增加信号时延，而降低时延的则降低了有效数据的利用率，对控制效果亦有所影响。本文研究的内容即是在相对静态的控制策略下处理多路信号相异的随机时延的方法，通过平衡数据利用率和时延大小来最小化异步时延对阻尼控制的影响。

## 第 2 章 电力物联网广域控制的仿真平台的设计

### 2.1 电力物联网广域控制仿真平台背景

当今物联网的理论已经得到了长足的发展，并得到了在各界广泛的关注，有越来越多的人力和物力都投入了对它的探索及应用项目中。但在实际应用中，物联网的最基本两大指标：信息保真度和执行忠实度仍然没有达到人们的期望值，是实现物联网技术进步和普及过程中的关键所在。

电力物联网（即智能电网）是当今物联网的重要应用方向之一。本仿真平台通过对实际电力系统以及与其连接通讯网络的建模来模拟电力物联网中的广域信号控制过程，并对电力系统的典型案例进行广域闭环控制的仿真实验，以验证物联网系统在实际工程控制中的有效性问题。同时，本仿真验证平台的建立可模拟实际通信系统中的各种现象，并通过对信号的控制及处理来实现物联网中信息保真性和执行忠实性两大关键性问题，并通过分析仿真结果验证控制的有效性。

同 1.3 节所述，本项目中的仿真平台是基于南方电网公司的真实电力系统建立的，从南方电网五省相连系统中提出来的子系统，其示意图如图 2.1 所示。

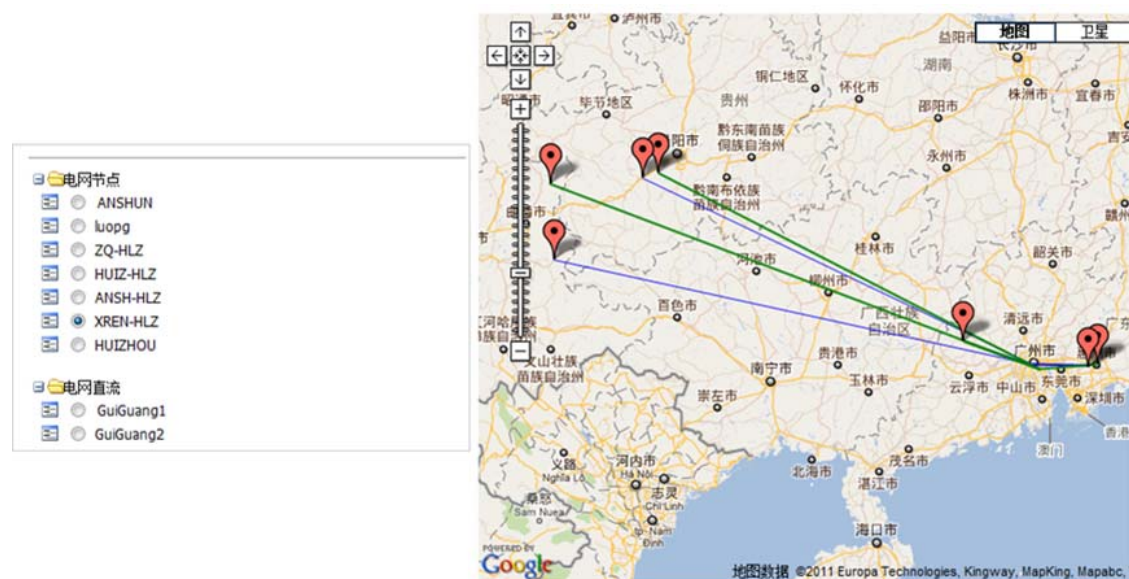




图 2.1 广域控制仿真平台的电网系统分布图

由于南方电网采用的是五省相连供电的方式，因此以上每条线路并不是独立的输送点系统，其之间是存在相互联系的，每两条线路之间的频率应基本相同（插值不超过 0.002Hz），若插值过大则容易使得整个输电系统中产生频率震荡等恶性现象，因此用广域控制的效果加强电网系统中阻尼控制的效果是很有必要的。

广域控制系统中的信号传输时延会削弱甚至完全破坏阻尼控制器的效果。目前在人们的研究中[10]-[12]，主要将时延作为一个独立的标量，或者说，对单个输入延时进行研究。这一模型适于在集中式的广域控制中，多路信号距离较近、时延差异不大的情况。

而本文所研究的问题中，广域控制系统的受控对象物理跨度大（如图 1.6 所示）。多路信号的时延不仅是随机的，而且相互不同，这样导致了多路信号到达不同步、时序颠倒情况的出现。这样，在接收控制信号的处理中，等待同步、调整时序将增加信号时延，而降低时延的则降低了有效数据的利用率，对控制效果亦有所影响。本文研究的内容即是在相对静态的控制策略下处理多路信号相异的随机时延的方法，通过平衡数据利用率和时延大小来最小化异步时延对阻尼控制的影响。

## 2.2 仿真平台模块设计

从上一节中的实际系统以及项目目的需求可以看出，为了考察时延等因素对电力物联网广域闭环控制效果的印象，本项目的仿真平台中需要包含电网端，通讯网端以及控制器端三大模块。其构成的基本系统如图 2.2 所示。

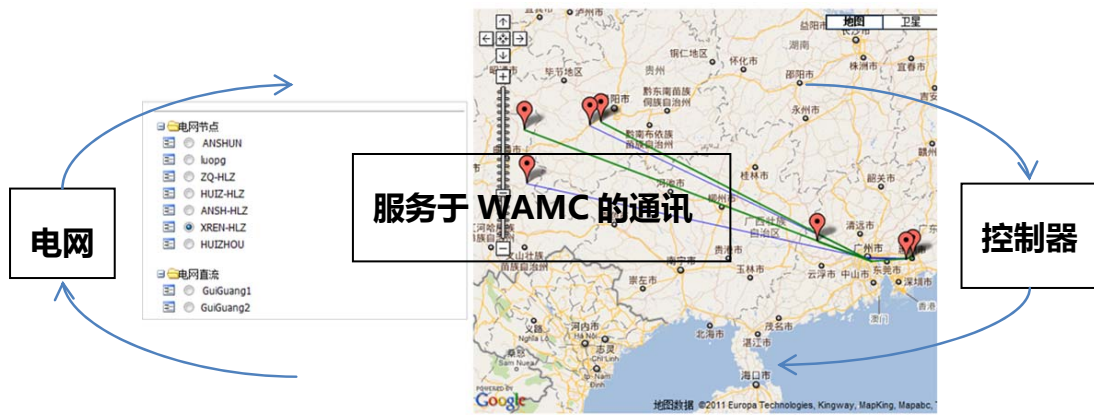


图 2.2 仿真平台系统模块示意图

图 2.3 中展现了平台模块的组成，每个模块的粗略分工，以及系统整体运行的简略流程。

电网端模块对电网传输线路进行案例仿真，将输电线路中的实时状态测量值通过通讯网模块传送至控制器模中；

通讯网模块中进行了网络时延模型以及数据排队模型的仿真，模拟现实通讯网络中的数据包传输延时情况；

控制器模块则将输入的实时数据进行分析，并通过通讯网将返回值传送至电网端的执行单元，以维持电网的稳定运行。

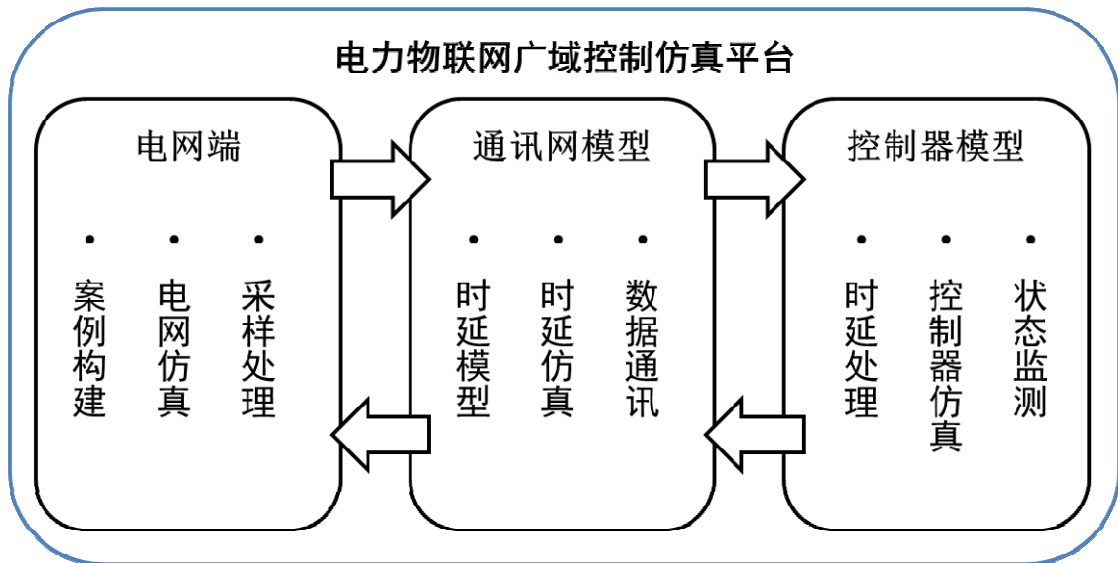


图 2.3 电力物联网广域控制仿真平台模块图

### 2.2.1 电网端模型

电网端仿真模块模拟电力系统中输电侧的情况，构建典型案例，能够观察输电侧在突发情况下的闭环控制效果。该模块需要完成的任务主要有案例构建，电网输电侧仿真，以及信号采样处理。

在本项目背景的案例下，多条线路之间的频率差会加剧整个区域内的电网系统震荡，甚至导致系统失控乃至瘫痪。案例构建部分负责模拟故障点前后的输电侧状态，从而观察广域阻尼控制对抑制电网频率振荡的效果。

电网仿真模型需要模拟实际电力系统输电侧的运行情况，即建立一个多输入多输出的仿真系统。该模型模拟电网中的动态元素（如发电机，电动机等）以及电力节点所构成的网络关系（输入与输出之间的电流关系等）。前者多用一组常微分方程进行建模，而后者多用大型稀疏矩阵进行描述[8]。

电网端的采样处理部分完成了对 WAMS 系统的模拟，以 0.001Hz 的速率采集电网输电侧的特征信息，如电压，电流，频率，有功及无功功率，相角等特征量。该功能将电网中的信息由连续量转换为能够为系统控制所用的离散量，通过接口将采样值交给通讯网络。

### 2.2.2 通讯网端模型

通讯网模型是整个仿真平台的核心部分，模拟了在 WAMS 系统与控制器终端之间的信息传送网络。其主要功能包括时延模拟，时延数据加载以及数据传送这三部分内容。

在时延模拟中，需要通过相应的数学模型生成每个数据在通讯网络中受到的时延情况，其实时延模型满足公式如下，其中为单个数据包的总延时情况； $D$  是在通讯网络线路中的线路传输延时，为一常量；而  $\delta$  则是随机生成的网络拥塞延时。

时延数据加载部分将数据包与时延相匹配，针对不同情况（丢包，错位等）做出处理，之后通过数据传送功能将多条通道内的一组数据一起传送至控制器模型。

### 2.2.3 控制器模型

控制器模块作为整个电网的决策控制中心，检测电网系统的运行状况，并根据当前情况作出需要电网节点调整的决策。其功能主要包括提供与通讯网络模型之间用于处理延时数据的接口，决策控制运算器，以及提供能够观察输入输出情况的用户界面。

其中较为重要的是数据接口和决策控制部分，这两部分将在第四章中着重介绍。

### 第 3 章实验平台初步搭建

在平台的模块结构确定后即开始进行仿真平台系统的搭建工作。在搭建成熟的仿真平台前需要先验证实验假设的有效性，即广域控制在电力物联网中对抑制低频振荡的有效性，以及时延对控制效果的影响问题。因此需要先快速搭建完整的平台系统，当题目有效性已得到验证后可再进行改进平台效率等步骤。

程序整体运行时需要三台计算机。其中一台计算机为 WINDOWS 系列操作系统，负责电网仿真数据传送以及控制器控制效果模拟；另外两台为 LINUX 操作系统，分别负责通讯网仿真和控制器模块。三个模块间通过通讯网模块进行数据传递和同步处理。

数据传输时，首先由电网向通讯网发送数据之后进入等待状态，通讯网收到数据后检查数据格式时候正确，确认无误后向控制器发送数据，控制器接收数据后仿真，仿真结束后发回确认信号和控制信息到通讯网。通讯网收到数据后检查数据格式，确认无误后将控制信息发回电网。电网根据控制信号进行控制效果仿真，仿真结束后发回控制后的电网情况到通讯网，开始下一轮循环。

该流程如图 2.3 所示，其中箭头标注的为数据流的流向。

## 3.1 电网端仿真模块

### 3.1.1 大电网仿真软件介绍

电网端进行案例构建与仿真的实时仿真程序由电机系提供，其用户界面如图 3.1 所示。该实时仿真程序是由 C 语言实现，并将其封装成能够直接运行的 MFC 可执行文件。



图 3.1 TH-STBLT 电网实时仿真软件界面

电网端仿真所用到的 TH-STBL 软件是清华大学电机系自 1983 年自助完成开发的第一套典型的传统大电网的仿真软件，用于潮流，故障，以及稳定性仿真等方面，在之后的多年中一直在进行改进更新。近年来，电机系在 TH-STBLT 系统上更新了能够并行进行超市是机电暂态仿真的能力，能够对更大规模的系统进行超实时仿真，期中包括了南方电网全部发、输电系统上万节点，因此非常适用于本项目中的情况。

如上文所述，该软件中利用一组常微分方程和一个大型稀疏系数矩阵对系统的输入输出进行模拟（分别模拟发电机等动态元素，和电力节点的网络关系），能够分析验证配电网中的动态与暂态行为，以及在电力系统中出现故障后配电网中的相应现象。

TH-STBLT 软件采用在电力工程界应用很广的隐式提醒积分法进行电力系统

模型的数值求解，收敛性和稳定性都能得到保证。在求解高阶大型的方程组时则会引入 LU 分解方法进行运算。

整个 TH-STBLT 软件的流程图如图 3.2 所示。

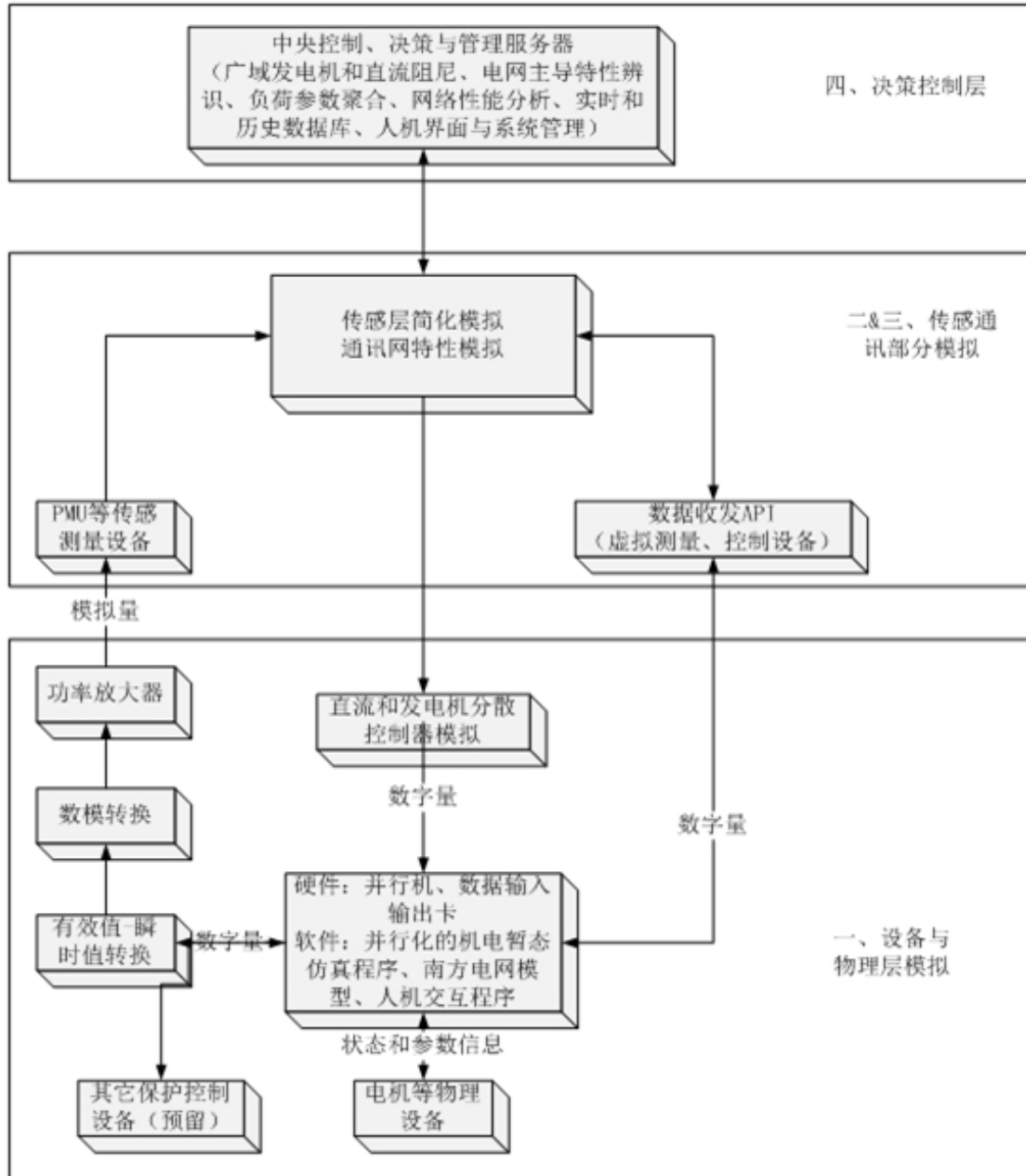


图 3.2 TH-STBLT 系统流程图

### 3.1.2 电网频率调节

- 频率控制

电力系统中的频率调控一直受到众多的关注。而随着电子设备以及仪器的精密化水平提高,为微小的频率变化不仅仅影响到了电力设备的经济性能,也会影响到电网的稳定运行。例如,当出现系统频率降低时,变压器和异步电机的励磁电流都会变大,导致系统中的总无功功率增大,不利于系统恒压控制,会造成电压降低等现象。因此如何保证电源频率的质量,以及系统中频率的稳定性是研究人员们关注的重点对象。

而在南方电网这种五省相连交直流并联输电的系统中,若相邻节点的频率差过大,则很有可能会引起系统失稳,产生震荡现象。因此实时对大电网进行实时的频率控制是十分必要的。

- 有功功率控制

在真实系统中,通常通过有功功率调节的方式对系统进行频率控制。下面简要介绍一下有功功率控制的原理。

在电力系统中,负荷做功需要一定的有功功率,同时系统输送一定的功率(包括有功功率和无功功率)也要在系统元件中引起有功功率损耗,因此有功电源发出的功率必须满足它们的要求,即系统运行中要求:

$$\sum PG = \sum PD + \sum PL$$

上式中,  $\sum PG$  为系统有功电源所发出的有功功率;  $\sum PD$  为系统有功负荷所需要的有功功率;  $\sum PL$  为系统网络元件所引起的有功功率损耗。

在研究频率控制以前,首先需要分析电力系统的频率特性。电力系统中的频率特性是指有功功率与频率静态特性。在稳态运行的情况器,该特性反映了有功功率和频率的相关性。下面,我们将先了解负荷和发电机组的频率特性,之后对全系统的频率特性进行研究。

在电力系统中,当负荷种类不同时,其对应的负荷与频率的关系也与不同。系统的有功负荷与频率关系可表示为:

+...

但在实际系统中允许的频率变化范围很小,此时负荷的功率与频率关系,即功频静特性可近似用一直线表示,如图 3.3 中所示:



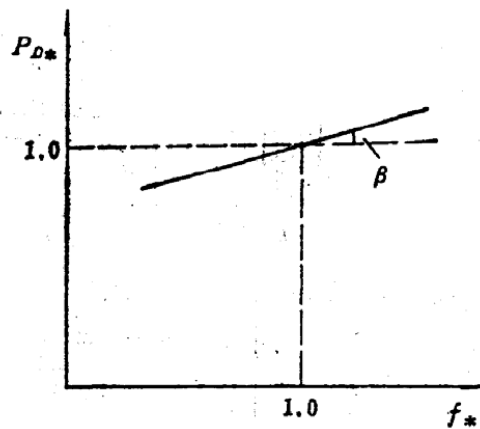


图 3.3 有功负荷的功频静特性

原动机的转速决定了发电机组的频率，因此发电机组的频率控制通常是由原动机的调速系统进行的，并决定了其有功功率与频率的静态特性。包含调速系统的发电机组的有功功率与频率的关系用有功功率——频率静态特性曲线表示，如图 3.4 所示，近似表示为一条直线，其有差调节性质反映在直线的向下倾斜上，即为发电机组的功频特性。

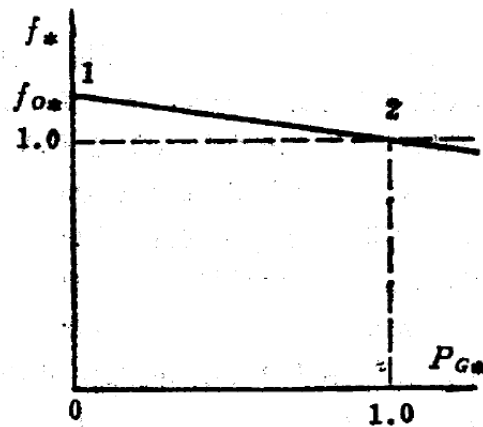


图 3.4 发电机组的功频静特性

由上述分析可知，仅依靠调速器进行频率的一次调整并不能维持发电机转速不变，也即不能维持频率不变。另外，当负荷功率增加（或减小）幅度较大时，频率下降（或增加）量大，有可能超出允许的范围。因此为了维持频率不变或限制频率的过分降低（或增加），都需要对频率进行二次调整，这由调速系统中的调频器来完成。

调频器的调整过程在功频静特性上的反映就是曲线的向上（或向下）的

平移，如图 3.5 所示，曲线①表示在额定负荷时频率低于额定值，此时可控制伺服马达使调频器动作，曲线上移至②，使额定负荷时达到额定频率。曲线③表示控制伺服马达，使曲线下移，在空载时频率达额定值。

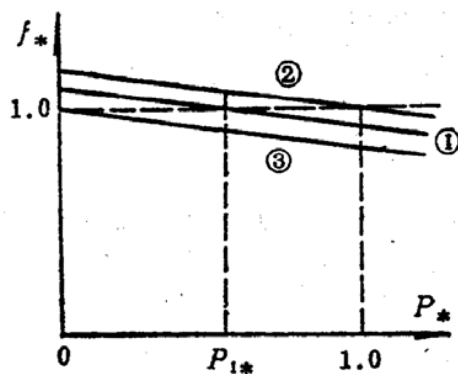


图 3.5 发电机组功频静特性的平移

若将上面分析的负荷频率特性和发电机组频率特性结合起来，就组成了电力系统的有功功率——频率静态特性，简称系统的功频静特性或频率特性，如图 3.6 所示：

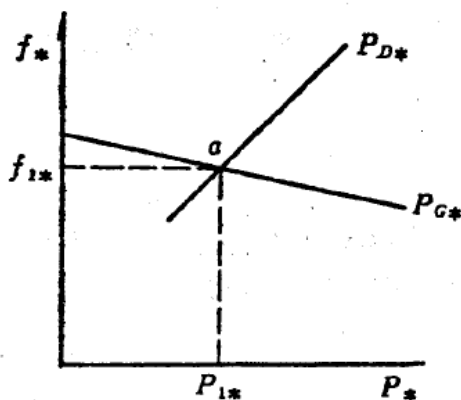


图 3.6 电力系统功频静特性

由以上分析可知，不难看出电力系统的频率控制可以通过对有功功率的调节来实现。且由于真实系统中允许的频率变化范围极小，因此有功功率调节是人们常用的调节系统频率的方法。

## 3.2 通讯网端模型仿真

### 3.2.1 网络模型

电力系统中的通信网络主要有三大类：高速专用网络通道，电网中的数据传送通道，以及日常使用的广域网络。其中，高速专用网络通常是具有特殊需求的单个应用项目准备的；而电网中的数据传送通道是为电力系统中的应用准备的专用通道，但多个电力系统中的应用可以共用该通道；而因特网则是对所有应用和流量都可以共用的广域网络。

其中，第二种通信网络中的时延现象较为全面，既包括第一种模型中的专用设备出现的随机故障时延，也包括了第三种模型中的其他应用中的数据包的干扰（允许多个应用共用通道），较为全面。同时该情况也比较符合实际电网系统中的应用情况。因此，在这里我们选择第二种通信网络，即电网中的数据传送通道作为建模对象进行研究。

### 3.2.2 流量模型

在流量模型中需要模拟数据包的到达以及发出情况。由于本项目是对多通道系统进行建模，因此还需要考虑多条通道中的时延相关性。但是不同通道中的参数和不确定性因素都是相互独立的，因此在进行建模时对每条通道单独建模即可，并不用考虑到时延之间的同步性。这样也导致了在系统中，相同时间发出的信号（具有相同时间戳）一般情况下在线路中受到的时延并不相同，因此到达控制终端的时间也并不相同。

#### ● 排队模型

在通道中，每个通道中 PMU 测量数据包的时延时间是由队列中在其前方的“噪声”数据包数量，以及路由器节点的处理能力决定的。

其中，假设有排队需求的请求数量服从泊松分布为  $P_n$ ，而每个请求的数据包大小为  $A_n$ ，服从负指数分布。泊松分布以及负指数分布的公式如图 3.7 所示。

$$P(P_n = k) = \frac{e^{-\lambda} \lambda^k}{k!}$$

$$f(x) = \begin{cases} \lambda e^{-\lambda x}, & x \geq 0 \\ 0, & x < 0 \end{cases}, \lambda_n = x$$

图 3.7 泊松分布和负指数分布公式

● 噪声流量模型

在每条通道中，信息数据包的传送情况均类似图 3.8 所示。其中 PMU 送出的实时量测数据包记为  $S_n$ ，每个数据包之间都是等间隔发出的，记 PMU 的采样频率为  $\frac{1}{\Delta}$ ，则该时间间隔为  $\Delta$ 。而噪声数据包记为  $N_n$ ，每个时间间隔  $\Delta$  内到达的数据包数量服从泊松分布，而其数据包的大小如上文所述，服从负指数分布  $Ex(\lambda)$ 。

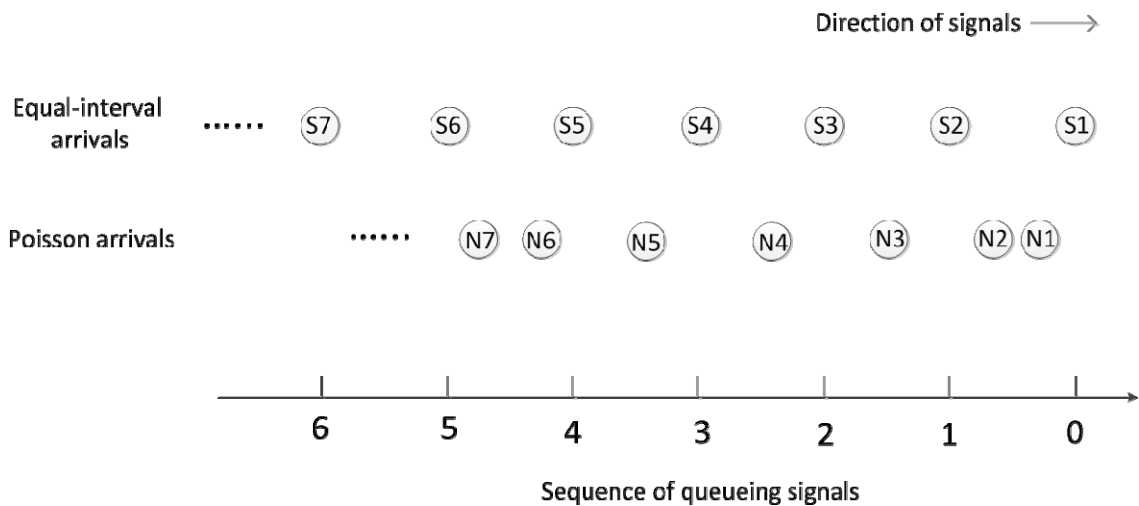


图 3.8 通道流量模型

此时 PMU 数据包所受到的随机时延则决定于其前面的时间间隔内的噪声数据包个数以及每个包的大小，和该路由器节点的处理能力。例如， $S_2$  被发送出去的时间应为  $S_1$  被送出的时间，加上处理噪声数据包  $N_1$  和  $N_2$  所需的时间。计算公式如图 3.9 所示，其中  $S_n$  表示第  $n$  个 PMU 数据包被送出的时刻， $\bar{Q}_n$  表示第  $n$  个 PMU 数据包的等待时间， $Q_{n_i}$  则表示从  $S_n$  起，第  $N_i$  个噪声数据包发送所需等待的时间。

$$\begin{cases} \delta_0 = 0 \\ S_0 = 0 \\ \delta_n = \max \left\{ \delta_{n-1} + \sum_{\{i: S_{n-1} < N_i < S_n\}} q_{N_i} - \Delta, 0 \right\}, \quad n \geq 1 \end{cases}$$

图 3.9 数据包等待时间模型示意

### 3.2.3 网络时延实现

通信网的编程采用异步 socket 通信程序实现。其基本流程如图 3.10 中所示。数据队列可以视为一个有双指针的链表，每个节点均为一个数据包，内有数据包大小，时戳，有标志位标记其是否为 PMU 数据包等元素。

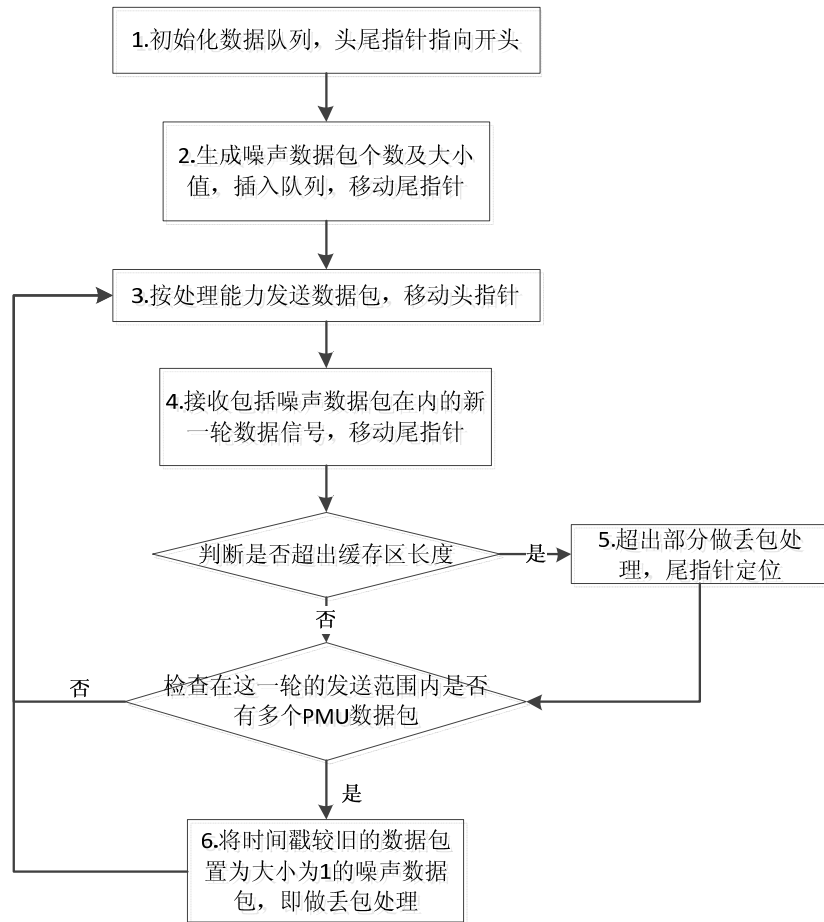


图 3.10 网络通信实现流程图

在每一轮向外递送数据时有两轮状态监测，其一是在接收数据包时查看该数据队列是否已满，若满则丢弃超出部分的数据；其二是在递送时检查在送出的数据包内是否存在多个 PMU 的电网监测数据包，由于控制器端在一轮接收中单通道只能处理一个 PMU 数据包，因此需要丢弃时间戳标记较旧的数据包，只保留最新的一个，剩下将 PMU 标志位置 0，当做大小为 1 的噪声数据包处理。

由上一节（3.2.2）中所述的模型性质可以看出，该模型可以视为一个排队论模型。而在排队论模型中，在系统容量并不为无穷大时，对达到数量和服务速率的数量关系是有所限制的，即单位内随机到达数量的期望值不能够大于服务速率，否则队列长度会无限制地增长。而在实际系统中，通常会到达率限制在服务速率的百分之八十及以下，以保证系统的正常运行。

因此实际仿真，在网络通信模块中设定参数时，还需要注意这一关系，不可另到达率超过队列的服务速度。

### 3.3 控制器初步模型及仿真程序

在实验初期我们决定使用 MATLAB 作为控制器平台的编程语言。虽然使用 MATLAB 搭建控制器模型会降低仿真的整体速度，但考虑到平台初步搭建完毕后，需要先验证广域控制以及相应时延处理机制的有效性再进行进一步实验。因此计划在有初步结果后再将控制器平台转移至 C 语言平台下。

本项目的平台以一套基于广域测量的大规模交直流互联电网多类型自适应协调阻尼控制系统为背景。该系统由 2375 个 PMU 测量子站(搭建平台时，控制器采用其中 11 个作为主要监测点)、224 个高压直流输电和大型发电机控制执行子站、三个中央及分布式控制主站组成(其中三个控制主站为直流功率控制，而另外一个控制站为发电机处理控制)，电力负荷网负荷总为 618 个，其中多项式负荷总数=554。实际仿真过程中为了避免计算机负荷过大，同时保证代表性，仅用到其中部分节点。

#### 3.3.1 控制器的显示界面

控制器的显示界面利用 MATLAB 下的图形用户界面(Graphical User Interface, GUI)组件搭建。用户界面由窗口，按钮，菜单等多种图形对象构成，用户能够通过编写并激活各个对象的相应事件实现与计算机的交互操作。

由 MATLAB 编程实现的控制器主界面如图 3.11 中所示，其中包括电网网架，通讯网网架和负荷网架信息查看，以及广域闭环控制这四项功能。



图 3.11 控制器操作主页面

电网网架用于监视电网频率信息，以及被监视节点的名称。项目中监视的节点总数为 49 个。其形制如图 3.12，3.13 中所示。







低电压等级处的支路信息，从而判断低电压等级处的负荷网故障。

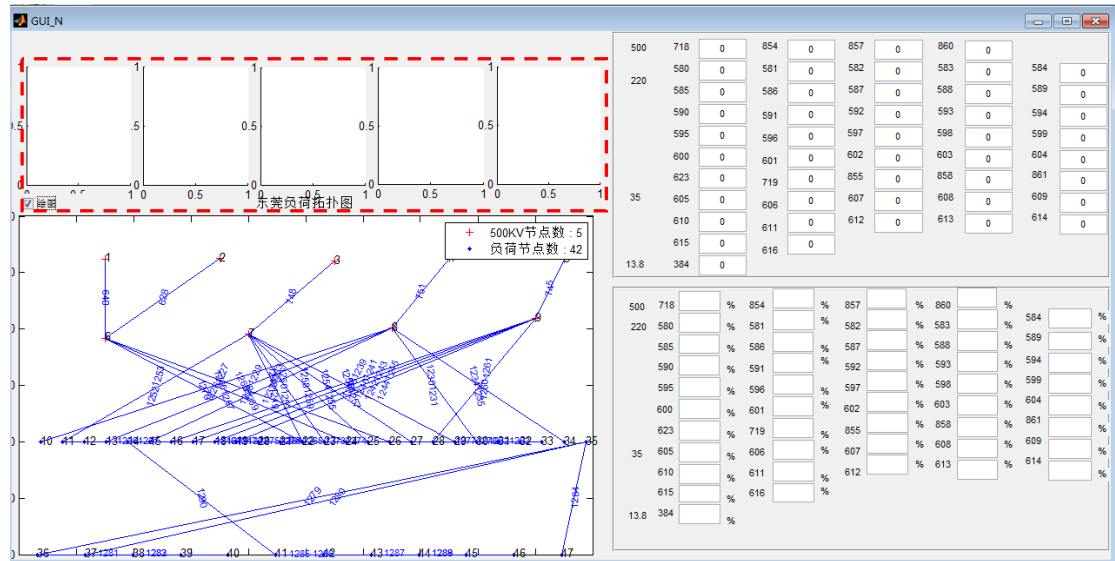


图 3.16 负荷显示界面

最后一部是广域控制器模块，其界面如图 3.17 中所示。控制器模块共包含三个主控制器。在开启控制器面板时，同时会开启三个.mdl 模块，在程序实际运行中，采用 SIMULINK 功能模拟控制效果。

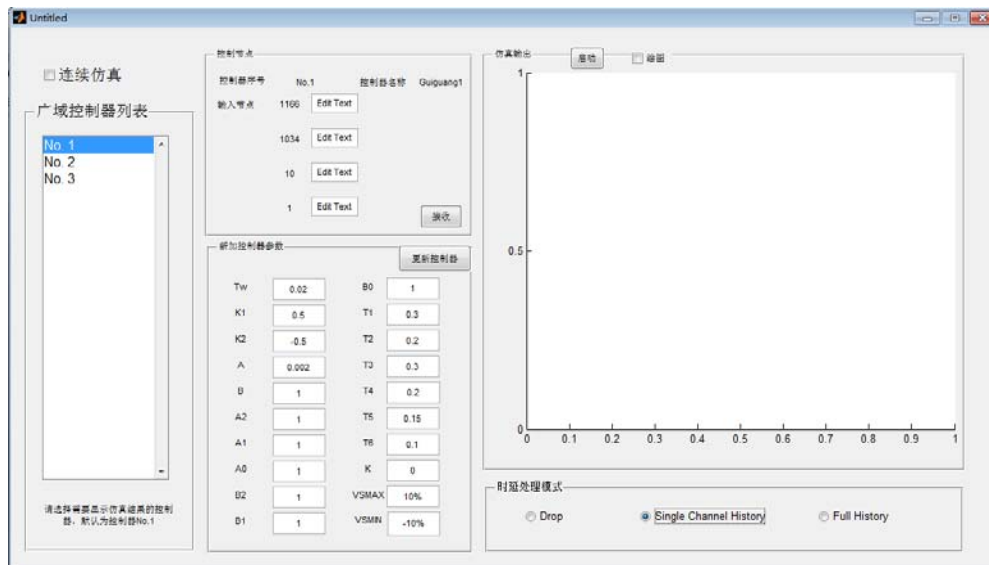


图 3.17 控制器界面

### 3.3.2 弱阻尼低频振荡控制器

控制器的核心部分即为用 SIMULINK 建立的弱阻尼低频振荡控制器。

由 3.1.2 节中所述的内容我们可知,可以通过调节系统中的有功功率来有效地调整线路中的频率。控制器以四条线路传送过来的监测电压值为输入,输出为直流功率控制量。整个控制器系统为四输入单输出系统。SIMULINK 中的控制器搭建如图 3.18 所示。

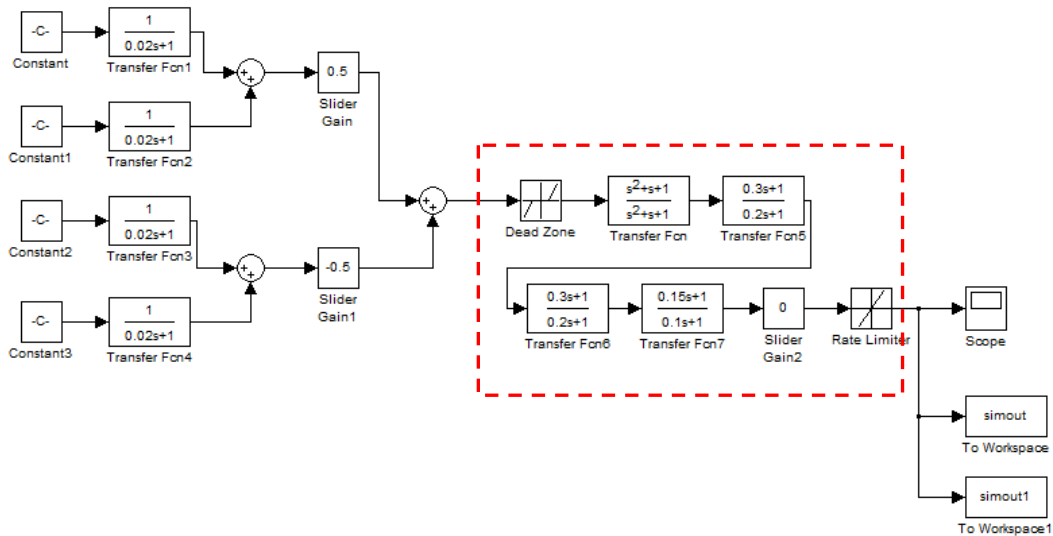


图 3.18 弱阻尼低频振荡控制器模型

每个监视点处存在一定时延,控制器的目标是平滑电网各点电压波动,同时调整惯性环节造成的相移。控制器的主要调节环节如图 3.1 中红框处所示。

本项目中可以同时存在多个控制器,下面将以一号控制器为例说明控制器输入输出的具体含义。一号控制器对应输入节点的地理分布图如图 3.19 所示。



图 3.19 输入节点地理分布

一号控制器的输入  $f_1$ 、 $f_2$  为区域 1 中的两个 PMU 测量点， $f_3$ 、 $f_4$  为 R 区域 2 中的两个 PMU 测量点。控制器比较区域 1 和区域 2 的平均频率，经过控制器计算后将控制信息发回电网端，由电网端发出对于区域 1、区域 2 的控制信号，其流程如图 3.20 所示：

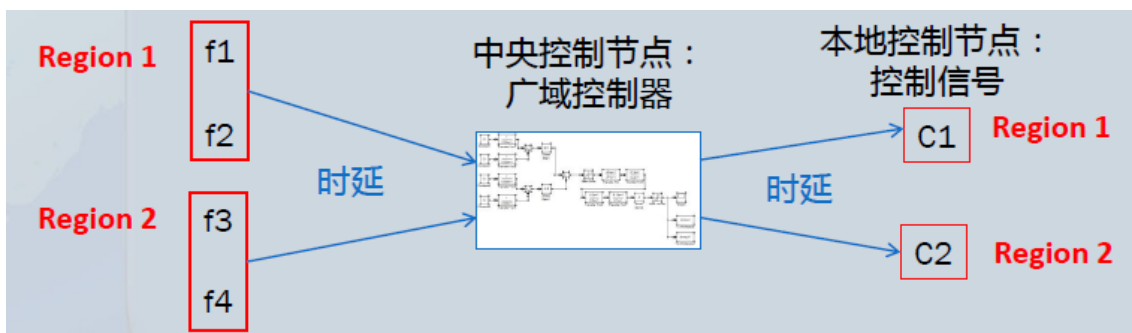


图 3.20 控制流程

### 3.4 实验目的有效性验证

本项目中搭建智能电网广域控制平台的目的是有两个。第一就是验证广域控制在电力物联网中的有效性；其次就是由于本次仿真平台的背景系统较为特殊，存在多路信号的问题，因此多路信号见的异步时延对控制效果的影响也是本项目的关注点之一。

### 3.4.1 广域控制有效性验证

在电网端运行相同的电网仿真程序，并执行相同故障点。令控制器平台正常输出，则得到的结果为存在广域控制时的仿真结果；当令控制器平台输出全 0 时，即为不存在广域闭环控制时的结果。

为了尽可能还原真实情况，令两次实验中均存在时延现象，但时延的分布情况完全相同。可得实验对比结果如图 3.21 和 3.22 所示。其中 3.21 中的仿真结果是不存在广域控制时的电网端结果，图 3.22 是存在广域控制时电网端的运行结果。



图 3.21 没有广域控制时的电网端仿真结果

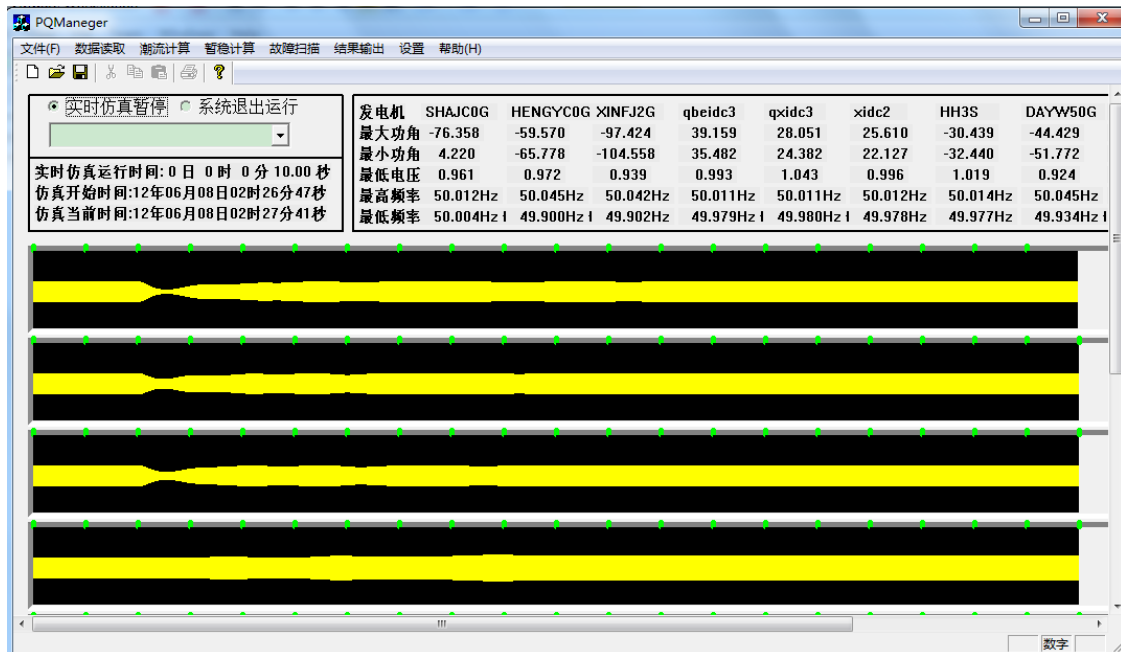


图 3.22 存在广域闭环控制时的电网端仿真结果

对比以上实验结果可以看出，在加入广域闭环控制后，线路在故障点之后平稳恢复，且没有过大超调；而在并未加如广域闭环控制的实验中，线路情况恢复较慢，且在调控过程中出现明显超调现象，可能会引起系统的不稳定。

由以上对比可以看出，在多地相连的交直流并联输电系统中，广域闭环控制的手段效果较为明显，利于系统控稳。

### 3.4.2 多路时延对控制效果的影响

在确认广域闭环调控在电力物联网中的作用后，还需要考察时延现象对系统中信息保真度以及实行忠实度的影响，即，时延对广域闭环控制效果的影响。由于本系统为多路通道系统，因此存在的时延为异步时延，每条通道中的随机时延并不相同，且相互独立。因此数据的实时性和同步性的关系比较也是我们关注的重点之一，将在第五章中给出分析比较。

由于在存在广域闭环调控的情况下，线路中的频率和功率变化均不是很大，因此两者在电网端的仿真结果并无太大差异，而控制器端的输出信号较为精确，可以从控制器的用户界面上观察两者区别。

图 3.23 中的曲线是在无随机延时的情况下一号控制器的输出曲线图，图 3.24 中所示的即为存在随机延时情况下二号控制器的输出图。

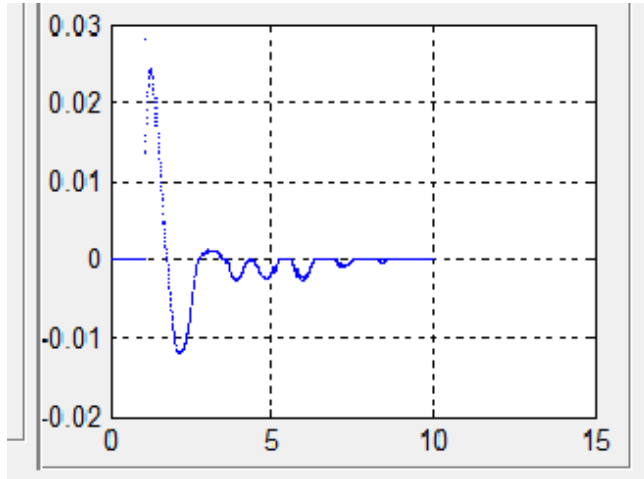


图 3.23 无时延情况下控制器输出图

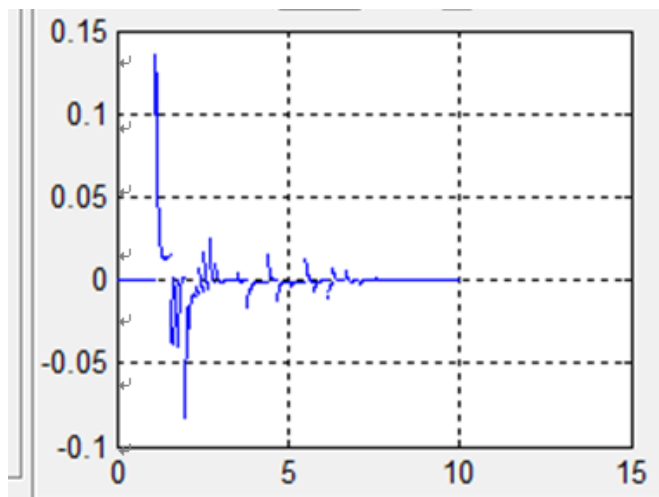


图 3.24 有时延情况下控制器输出图

对比以上两图可以看出，在无时延的情况下，控制器输出平稳连续，控制效果较好，而在存在时延的情况下，控制其输出并不平滑，对系统控制较为不利。因此可以得出，异步时延的存在对广域闭环调控影响较大，应寻找方法解决该问题。

### 3.4.3 初步结论

由以上两点初步结果所得的结论来看，广域闭环控制器在多地相连的交直流并联输电系统中的调控作用是十分明显且必要的；在广域电网系统中通信网络中产生的多通道异步时延现象会影响在电力物联网中的信息保真性以及执行忠实度，因此有必要在控制器和通讯网络之间的接口程序中对其进行处理，以改进广域调控效果。

另外，由于控制器原型采用 MATLAB 中的 GUI 以及 SIMULINK 组件实现，因此仿真速度较慢，不适合做大量实验收集数据。同时考虑到在后期实验中用户界面的需求并不如数据需求紧急。因此考虑将其移植至 C 平台下开发实现，方便数据收集。



## 第 4 章控制决策层数据接口的设计与实现

如 3.4 节所述, 在已知多通道异步延时会抑制广域控制器调节效果时, 考虑在网络通信模块与移植后的控制器模块之间的接口程序中加入数据处理环节, 以考察针对时延的各种处理方法对广域控制器调节效果的影响。

### 4.1 相关研究

广域控制系统中的信号传输时延会削弱甚至完全破坏阻尼控制器的效果。文献中的相关研究可大体分为两个方面。一类是考虑时延影响的广域控制器的设计策略, 如基于预测的  $H_\infty$  控制策略[1]. 文献[2]中给出了一种非常便于计算的 GS 算法, 能够用一个线性矩阵不等式(LMI)的优化问题替代  $H_\infty$  稳定和性能的问题; 在[2]基础上, 文献[3]给出了平衡时延容忍度和控制效果的增益调节方法。二是对广域控制系统时延的建模, 文献[4]中同时给出了确定性的路由时延, 以及基于排队网络的随机时延的计算方法, 并指出控制信号的计算时间在整体实验中占到了相当大的比例。作为更一般性的对时延影响的研究, 文献[5]通过小信号稳定区域的边界刻画了时延对系统稳定性的影响。

上述文献研究中, 主要将时延作为一个独立的标量, 或者说, 对单个输入延时的研究。这一模型适于在集中式的广域控制中, 多路信号距离较近、时延差异不大的情况。

而根据第一章第三节中所述的工程背景可知, 本项目中的大电网是五省相连的交直流并联输电系统, 广域控制系统的受控对象物理跨度大, 因此除了单个输入的延时外还需要考虑多通道同步问题。多路信号的时延不仅是随机的, 而且相互不同, 这样导致了多路信号到达不同步、时序颠倒情况的出现。这样, 在接收控制信号的处理中, 等待同步、调整时序将增加信号时延, 而降低时延的则降低了有效数据的利用率, 对控制效果亦有所影响。本文研究的内容即是在相对静态的控制策略下处理多路信号相异的随机时延的方法, 通过平衡数据利用率和时延大小来最小化异步时延对阻尼控制的影响。

## 4.2 时延处理策略设计

由第三章的总结可知，在时延处理问题上我们主要的关注点是在多通道的电力物联网的信息系统中，对于控制效果而言数据同步性与实时性哪项更为重要；此外在确定该性质后，如何处理数据能得到更好的控制结果也是本项目关心的重点之一。

### 4.2.1 同步处理策略

- 缓存区搭建

要完成整理并使得数据同步的任务，则需要在控制器模块和通讯模块之间建立能够存储数据的缓存。在注重数据同步性的同步处理策略中，需要建立具有时标的缓存区，其示意图如图 4.1 中所示。

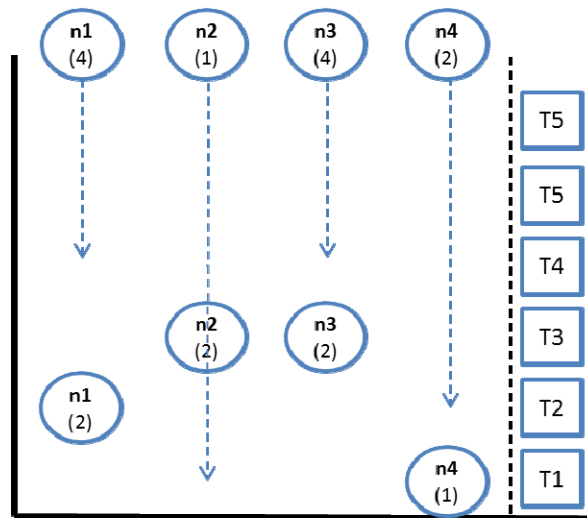


图 4.1 带有同步时标的缓存区

通道中送来的实时数据带有时标，在本缓存区中，送来的数据会按后续时标匹配的方式送入缓存区中存储。

程序中会建立长度一定的缓存区，当缓存区中的某一行到达最长长度时，即需要删除缓存区底层已使用过的行，并将其上的顺次向下平移。因此在程序中，缓存区的每一行都带有标志位，用于记录该行数据是否已被使用过。

- 数据处理策略

在具有数据同步处理的缓存区中主要使用了两种数据处理策略，用以验证数据真实性和实时性对系统控制的影响。

两种策略中均使用了插值的方法对数据进行了处理，其不同之处在于，第一种方式只在当前需要输出的一组同步数据并未到齐时（存区中当前存在数据的最上一行时间戳），在没到齐的通道中使用插值算法计算应输出的同步数据；而第二种方法则是采用了全部通道进行预测，预测当前时间戳应送出的数值，而不是以缓存区中最上一行的时间戳为标准。

#### 4.2.2 实时处理策略

- 缓存区搭建

在实时处理策略中，缓存区中并不需要统一的时标列。因此可建缓存模型如图 4.2 所示。每一列通道的数据可以看成是一个队列，当新数据送至时，只用比较新到数据的时标与队列顶层数据包的时标。当时标大于当前队列顶端的时，将数据包置于队列顶端即可。若新数据的时标小于顶层时标时，需要丢弃新来的数据包。

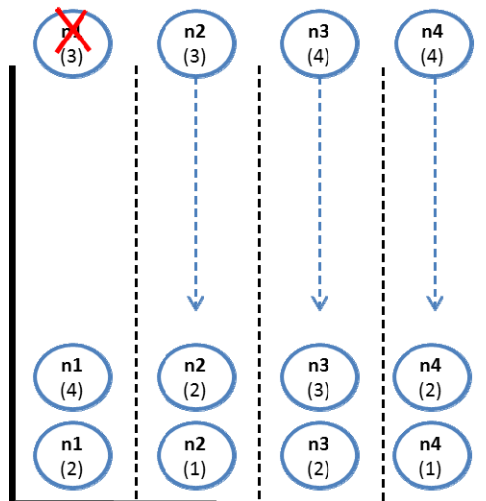


图 4.2 不带同步时标的缓存区

- 数据处理策略

在并不具有数据同步处理的缓存区中主要使用了三种数据处理策略，用以验证数据真实性和实时性对系统控制的影响。这三种数据处理策略分别称为 SCH (Single Channel History), SCC (Single Channel Calculate), 以及 FCC

(Full Channel Calculate)。

第一种策略 (SCH) 是指单通道使用历史值。即当控制器需要一组输入数据时, 若目前在缓存区内的数据长度并不相等, 则缺少输出值的那一列通道取该缓存区通道内最上方 (即最新数据) 的数据输出即可。该策略偏重数据的真实性。

第二种策略 (SCC) 是指单通道采用计算值, 及考虑到数据的实时性由于通道延时受到影响, 因此采用插值的方法算出缺少的数值。即当控制器需要一组输入数据时, 若目前在缓存区内的数据长度并不相等, 则缺少输出值的那一列通道取该缓存区通道内最上方的若干组数据, 计算得出长度相等时的数值并输出。该策略偏重数据的实时性。

第三种策略 (FCC) 是指全部通道采用计算值, 在 SCC 的基础上兼顾了数据真实性和统一性。当控制器需要一组输入数据时, 若目前在缓存区内的数据长度并不相等, 则当前全部通道的输出值均取该缓存区通道内最上方的若干组数据, 计算得出长度相等时的数值并输出。

## 第 5 章实验结果及分析

### 5.1 实验设计及原始数据采集

在验证过实验目的有效性后，将实验平台全部移植至 C 语言平台，以方便进行大规模实验，以采集足够的数据进行效果分析。

#### 5.1.2 实验流程

实验可以大致分为三个部分进行。第一是配置文件的写入与更新，之后是仿真平台的开启与运行，最后则是数据收集与初步处理。下面将分别介绍这三部分流程实验程。

- 配置文件读写

仿真平台中有两部分需要读取配置文件，分别是三个模块之间数据交互的网络 IP 地址，二是进行在网络通信模块和控制器模块进行时延分配和策略选择时需要读取配置文件中的数据再进行处理。

图 5.1 中所示的即为电网模块以及控制器模块中负责交互通讯 IP 地址的配置文件。其中左边为电网模块中的地址配置文件，txt 文件中存放通讯网模块接口的 IP 地址，当程序运行时会自动读取该地址，进行数据交互。而右图则为控制器模块中的配置文件，该文件不仅提供了与通信网模块进行交互的 IP 地址，同时第一行数字代表了控制器数据缓存区中对数据作出的处理算法。

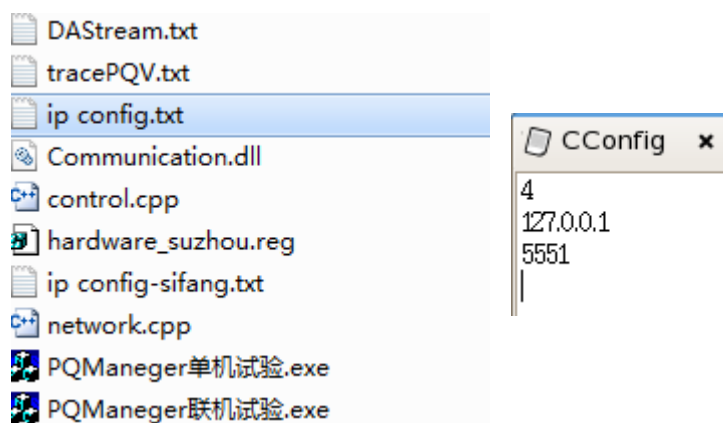
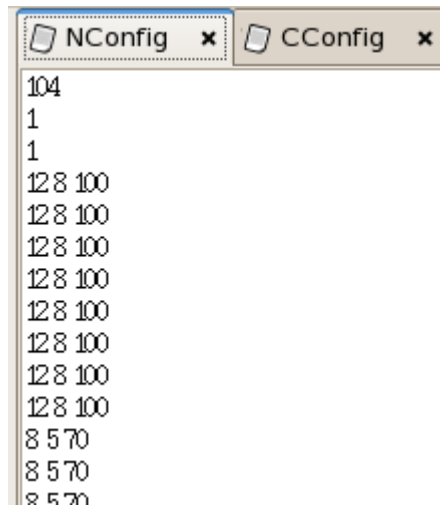


图 5.1 电网模块和控制器模块中的配置文件

图 5.2 中所示的即为通信网模块中的配置文件。里面的数字代表了时延产生的模式：当第二行与第三行数字均为 1 时，该系统采用以泊松分布和负指数分布为基础的随机时延，泊松分布以及负指数分布的期望值分别为第四行至第十二行中第一列和第二列数字的取值，第三行数字则代表了该网络节点处理数据的能力。



```
104
1
1
128 100
128 100
128 100
128 100
128 100
128 100
128 100
128 100
128 100
128 100
8 570
8 570
8 570
```

图 5.2 通信网模块中的配置文件

- 仿真平台运行

整个仿真平台由三大模块构成，每个模块均以 C 语言为基础开发实现。

在运行平台时，需首先在 LINUX 机器上开启作为整个系统的基础的通信网模块；之后仍然在 LINUX 机器上开启控制器模块；待两模块均平稳运行后方可开启电网仿真模块，否则平台系统可能会出现意外退出的情况。

- 数据收集与初步处理

保证系统的处理能力为定值，分别在松分布以及负指数分布期望乘积不同的情况下，采用同步缓存和异步缓存方式中的七种数据处理方式进行仿真。在得到仿真的初步结果后，将其放入 MATLAB 中进行数据的初步处理，得到系统输出曲线，时延分布曲线，以及系统特征值等数据。MATLAB 的某次运行结果如下图所示，其中图 5.3 是系统特征值的处理结果，图 5.4 是本次时

延分布图（验证随机性），图 5.5 为系统输出曲线。

```
Mean_Delay =  
    32.6760  
  
RealDelay =  
    95.7014  
  
MAX_PEAK =  
    0.0535  
  
t_0 =  
    109  
  
result =  
    newIn: [2000x1 double]  
    gamma: 0.0352  
    max_st: 0.0253  
    s0: 0.0535  
    M_p: 0.4724  
    tr: 1946  
    relV1Time: 1459  
    relV2Time: 1458  
    absVTime: 1712
```

图 5.3 系统特征值处理结果

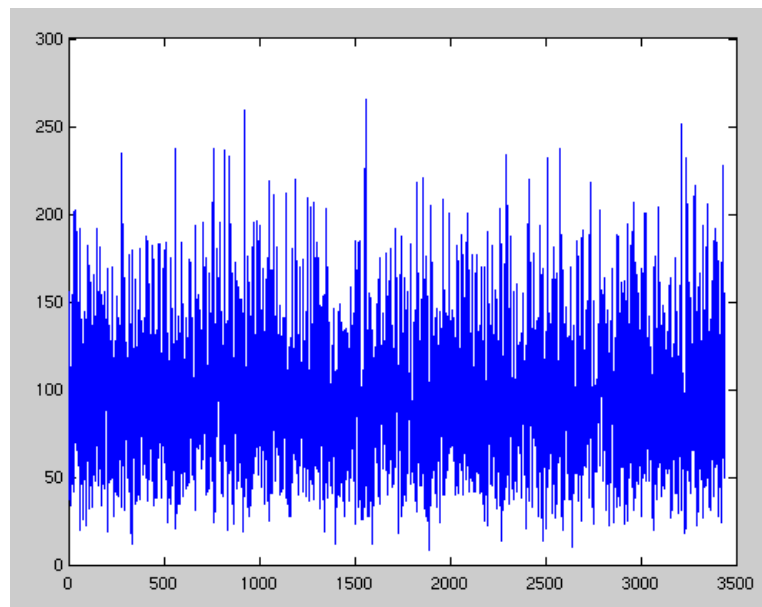


图 5.4 时延分布图（验证随机性）

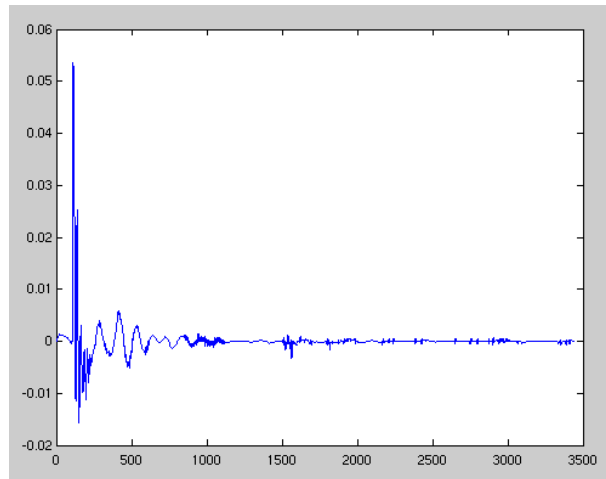


图 5.5 为控制器系统输出曲线

## 5.2 实验数据分析与对比

改变网络中的随机时延期望，即更改配置文件中泊松分布以及负指数分布的期望值，以此为基础进行对大量实验，希望能够从数据中分析出一定的规律。对大量实验数据进行筛选提取，可得初步结果如下所示。

### 5.2.1 无同步自身对比

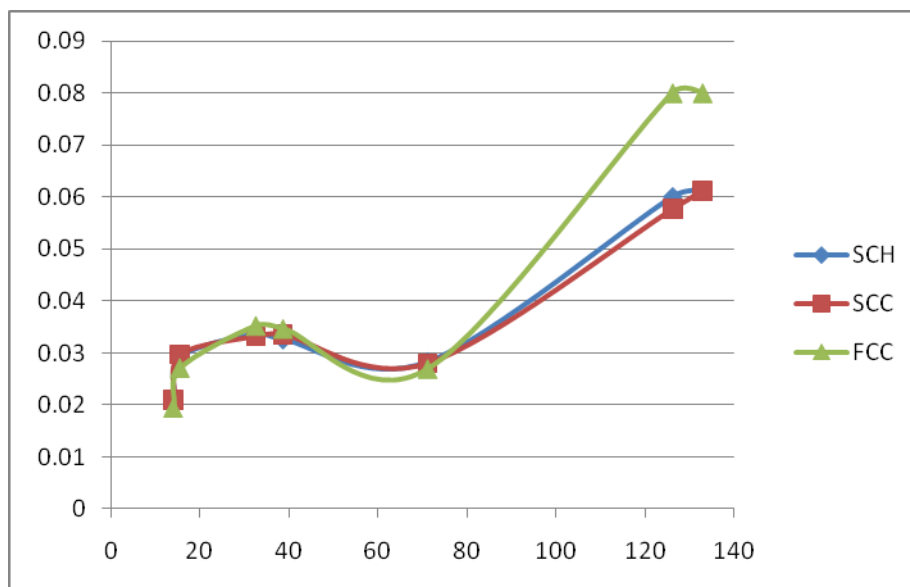




图 5.6 无同步的缓存区数据处理方法对比

当使用无同步的缓存区时，系统更注重的是数据的实时性。通过不同的数据处理方法可得结果如图 5.6 所示。

分析以上数据可以看出，在系统延时较小时，FCC 的控制效果略好于另外两种；但是当系统延时增大时，FCC 的控制效果不稳，且出现失稳的趋势。因此对比而言，SCC 的整体控制效果更加稳定。即，在系统中，数据的实时性对控制效果更加重要。

### 5.2.2 有同步自身对比

当使用有同步的缓存区时，系统更注重的是数据的同步性（多通道数据）。通过不同的数据处理方法可得结果如图 5.7 所示。

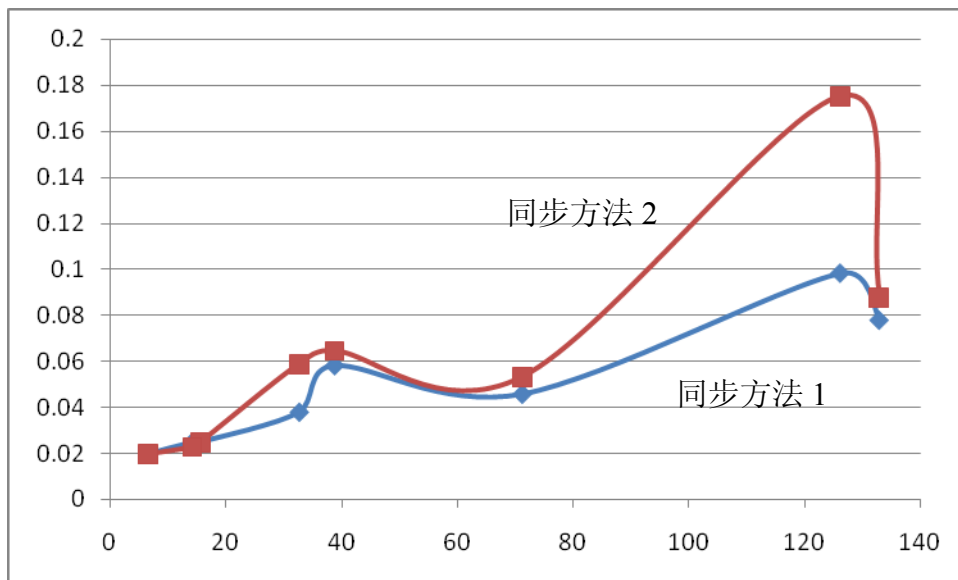


图 5.7 有同步的缓存区数据处理方法对比

分析以上数据可以看出，同步方法 1 无论在大延时还是小延时的情况下，其控制效果均好于同步方法 2。由上一章的分析可知，方法 1 比方法 2 的数据实时性更强，即，在保证同步性的系统中，数据的实时性对控制效果更加重要。

### 5.2.3 整体对比

将在两种缓存方式向表现较好的数据取出进行对比，可得曲线对比图如图 5.8 所示。

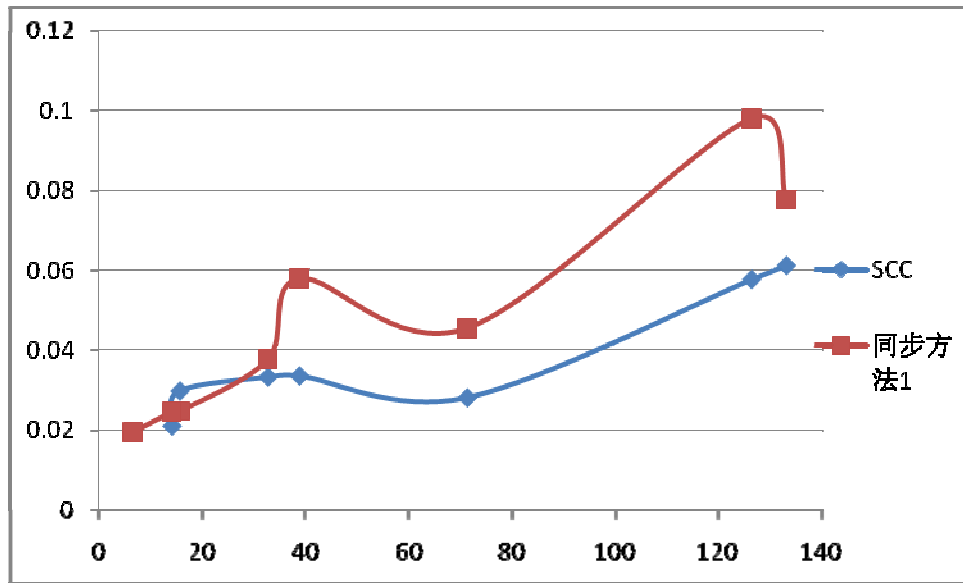


图 5.8 两种系统下的数据对比

可以看出，虽然同步方法 1 在系统时延增长时，有控制效果变好的趋势，但是其整体控制效果远不如 SCC 的控制效果。

同时从以上曲线中我们还可以看出，在大延时的情况下，有缓存区的算法结果出现了拐点，控制效果明显变好。可以考虑利用固定时延的方法替代排队算法（排队算法的最大时延有限制）来研究其在大时延情况下的表现。

## 5.3 实验初步结论

由以上由大量实验结果得出的数据可以看出，在广域的电网控制系统中，数据的实时性要求十分高，甚至超出了我们预估的多通道数据同步的重要性（系统背景是多省联合供电系统）。因此在下一步的研究中，我们应当将重点放在如何部署网络节点以有效减少时延上，以及进一步结合已有结果，设计出更好的缓存

区数据处理策略，使得电网的整体控制效果更好。

## 第 6 章总结与展望

### 6.1 工作总结

随着信息技术的蓬勃发展，人们对物联网的重视程度日渐提高，电力物联网作为物联网的重要应用之一，有着很大的发展以及应用前景。

本项目以实际电网系统作为背景，对其建模，研究智能电网技术在实际应用中所遇到的问题。我们以智能电网系统中广域控制的效果性能为关注点，通过对系统建模的方式，研究时延及其处理对控制效果的影响。

首先，我们以 C 语言作为平台，对整个系统进行仿真，搭建了完整的仿真平台，为以后进行各类研究奠定了基础。在完成平台的搭建工作后，本项目对通讯网中的时延现象进行仿真，搭建了排队模型，在以建好的智能电网广域控制仿真模型中进行了大量实验研究，并得到了一些初步结论。

在实际的多通道电网系统中的信息数据包中存在两种问题，一是单通道时延引起的数据实时性问题，二是由于多通道时延相互独立而引起的同步性问题。针对以上两个问题，本项目中搭建了两种控制器端数据缓存区，分别加强了数据包的实时性和同步性。从实验结果中则可以看出，在真实的多通道电网系统中，数据的实时性对系统广域控制效果的影响更大，而对数据做出预测和处理也是增强控制效果中必不可少的。

### 6.2 展望

1. 将排队模型换为固定时延模型，以扩大时延范围，研究大时延下不同处理方式的效果；

2. 增加多种数据处理方式，讨论是否能将数据挖掘中的处理方法应用于本项目中，以改进控制结果；

3. 对网络节点进行建模，研究如何部署网络节点能够有更好的数据实时性效果。

## 插图索引

图 1.1 信息保真及执行忠实问题分析 .....	2
图 1.2 传统电网及智能电网框图 .....	4
图 1.3 智能电网信息体系架构示意图 .....	5
图 1.4 电力系统基本机构图 .....	7
图 1.5 通信网络的基本构架图 .....	8
图 1.6 智能电网决策执行模块示意图 .....	9
图 1.7 2010 年南方电网地理界线示意图 .....	12
图 2.1 广域控制仿真平台的电网系统分布图 .....	14
图 2.2 仿真平台系统模块示意图 .....	15
图 2.3 电力物联网广域控制仿真平台模块图 .....	16
图 3.1 TH-STBLT 电网实时仿真软件界面 .....	19
图 3.2 TH-STBLT 系统流程图 .....	20
图 3.3 有功负荷的功频静特性 .....	22
图 3.4 发电机组的功频静特性 .....	22
图 3.5 发电机组功频静特性的平移 .....	23
图 3.6 电力系统功频静特性 .....	23
图 3.7 泊松分布和负指数分布公式 .....	25
图 3.8 通道流量模型 .....	25
图 3.9 数据包等待时间模型示意 .....	26

图 3.10 网络通信实现流程图 .....	26
图 3.11 控制器操作主页面.....	28
图 3.12 电网网架结构图.....	29
图 3.13 电网网架节点名称显示界面 .....	29
图 3.14 通讯网网架结构图.....	30
图 3.15 通讯网网架节点名称显示 .....	30
图 3.16 负荷显示界面.....	31
图 3.17 控制器界面.....	31
图 3.18 弱阻尼低频振荡控制器模型 .....	32
图 3.19 输入节点地理分布.....	33
图 3.20 控制流程.....	33
图 3.21 没有广域控制时的电网端仿真结果 .....	34
图 3.22 存在广域闭环控制时的电网端仿真结果 .....	35
图 3.23 无时延情况下控制器输出图 .....	36
图 3.24 有时延情况下控制器输出图 .....	36
图 4.1 带有同步时标的缓存区 .....	39
图 4.2 不带同步时标的缓存区 .....	40
图 5.1 电网模块和控制器模块中的配置文件 .....	43
图 5.2 通信网模块中的配置文件 .....	43
图 5.3 系统特征值处理结果 .....	44
图 5.4 时延分布图（验证随机性） .....	45
图 5.5 为控制器系统输出曲线 .....	45
图 5.6 无同步的缓存区数据处理方法对比 .....	46

图 5.7 有同步的缓存区数据处理方法对比 .....	46
图 5.8 两种系统下的数据对比 .....	47





## 参考文献

- [1] 卫江, 曹荣新, 曹增新, 智能电网综述史, 华北电力技术 No. 5 2010
- [2] 国家电网智能化规划总报告, 国家电网公司, 2010.3
- [3] Jon Froehlich, Eric Larson, etc, “Disaggregated end-use energy sensing for the smart grid”, *Pervasive Computing*, Vol.10, No.1, 28-29, 2011
- [4] Phadke A.G., de Moraes R.M., “The Wide World of Wide-area Measurement”, *Power and Energy Magazine*, Vol.6, No.5, 52-65, 2008
- [5] M.Chenine, I. Al Khatib, J. Ivanovski, V.Maden, L. Nordström, “PMU traffic shaping in IP-based Wide Area communication”, *Proc.5th International Conference on Critical Infrastructure*, 2010, 1–6
- [6] 马韬韬李珂朱少华郑晓郭创新李乐, 智能电网信息和通信技术关键问题探讨, 电力自动化设备, 第 30 卷第 5 期
- [7] 白红伟, 马志伟, 宋亚奇, “基于云计算的智能电网状态监测数据的处理”, 华东电力, 第 39 卷, 第 9 期
- [8] P. KUNDUR, *Power System Stability and Control*, 1994, p. 849.
- [9] 赵伟, 973 项目申请书——物联网基础理论和设计方法研究, 2010 年 3 月
- [10] Balarko Chaudhuri, Rajat Majumder, and Bikash C. Pal. Wide-Area Measurement-Based Stabilizing Control of Power System Considering Signal Transmission Delay. *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, VOL. 19, NO. 4, NOVEMBER 2004. pp1971—1979
- [11] H. Wu and G. T. Heydt, Design of delayed-input wide area power system stabilizer using the gain scheduling method, in *Proc. IEEE PES General Meeting*, Toronto, ON, Canada, 2003.
- [12] H. Wu, K. S. Tsakalis, and G. T. Heydt. Evaluation of time delay effects to wide-area power system stabilizer design", *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 19 , no. 4, pp.1935 - 1941 , 2004.
- [13] 刘莉, 陈学锋, 翟登辉, “智能配电网故障恢复的现状与展望”, 电力系统保护与控制, Vol.39, No.13, 2011

- [14] 庞清乐, 高厚磊等, “面向智能配电网的保护与控制方法”, 电力系统保护与控制, Vol.38, No.21, 2010
- [15] Qin Lijun, Guo Qing, Hao Cuijuan, Jin Huawei, “A new wide area measurement system model based on common information model”, 4th International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies, 2011
- [16] 《南方联营电网及西电东送》, 广东节能, 1996 年 4 期

## 致谢

首先，在这里要向从大三就开始指导我进行科研项目工作的导师曹军威老师表示由衷的感谢。在加入实验室的两年中，曹老师一直给予我肯定和鼓励，激励着我在科研项目上继续走下去。在大四下学期的毕设期间，我作为一名本科生第一次接触学术论文的撰写工作，曹老师的耐心指导不仅让我学到了论文的正确行文思路，也为我拓宽了视角，为以后的学习工作打下了坚实的基础。因此在这里要再次感谢曹老师给我的各种帮助与指导。

此外，在这里还要感谢实验室的涂国煜师姐，以及万宇鑫师兄在整个科研项目中给予的大力无私帮助。没有他们的指导我不可能完成这样一个较大的项目工程。尤其是万宇鑫师兄在代码编写，思路拓展以及论文行文上的帮助给了我很大的启发，并解决了很多关键技术难点。

同时也要感谢电机系的张树卿师兄，他十分耐心地解答了我对于很多电机专业方向的问题，使得论文能够顺利行文。

也要感谢同组的刘小非同学在大四一年中的合作与激励，使得我顺利走过了大四一年紧张的生活。

最后，我想感谢在清华大学中的这四年的学习和生活。可以肯定地说，在清华大学四年的学习生活是人生中最宝贵的一段经历，一笔财富。四年中我收获了知识，收获了友谊，培养了管理能力，也接触了科研生活。如今就要迈上人生新的征途，相信大学四年内学到的，以及感悟到的一切，会帮助我这一路上走的更好更潇洒。



## 声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

签名：\_\_\_\_\_ 日期：\_\_\_\_\_



## 附录 A 书面翻译

**Mask:** 一个基于隐私保留策略使用已发布内容的系统

### **Mask: A System for Privacy-Preserving Policy-Based Access to Published Content**

Mohamed Nabeel, Ning Shang, John Zage, Elisa Bertino

#### 摘要

本文中我们展示了 *Mask*，第一个处理下面这个看似不能解决的问题的系统：如何基于将表达成针对用户身份属性条件的访问控制策略，选择性地在一组用户中分享内容，同时确保这些来自内容发布者的身份属性的隐私性。*Mask* 由三个实体组成：一个内容发布者 (*Content Publisher*)，用户被称为 *订阅者* (*Subscribers*)，以及发布有保证的身份属性的 *身份提供者* (*Identity Providers*)。内容发布者指定针对订购者身份属性的访问控制策略，指示了订阅者身份属性必须验证哪些条件以访问一个文档或子文档。*Mask* 最主要的创新点在于，即便发布者可以针对其自己的访问控制策略匹配身份属性，发布者并没有学会订阅者身份属性的值；因此授权订阅者的隐私得以被保护。基于指定的访问控制策略，文档被划分成子文档，子文档拥有用不同密钥加密的访问控制策略。订阅者会得到他们被授权访问的子文档的密钥。*Mask* 中的密钥分布由一个新的组密钥管理协议支持，使用该协议，订阅者可以使用从发布者处得来的订阅信息，重建解密密钥。然而，发布者不知道每个订阅者可以重建哪个解密密钥。在本示例中，我们使用了一个医疗保健的场景。

#### 分类与学科描述

I.7.4 [Document and Text Processing]: Electronic Publishing;

H.2.4 [Database Management]: Systems

#### 一般术语

设计 (Design), 管理 (Management), 安全 (Security)

## 关键词

访问控制，隐私，身份，广播系统，组密钥管理

## 1. 介绍

电子媒介的迅速增长使得开放或封闭环境中的信息发布与信息共享都变得简单有效。然而，选择性地访问敏感信息应当被强制执行，以遵守法律需求、组织政策、订阅条件等。因此，自动强制执行的访问控制策略和机制必须在适当的地方实行。像 XACML 一样的现代访问控制语言支持根据用户的特性指定访问控制策略。这些特性的例子被称为 *身份属性* (*identity attributes*)，包括年龄、国籍和组织中扮演的角色。如果用户的身份属性满足策略中所有的条件，他/她就满足一个给定的访问控制策略。一个关键的课题是通常只有记录了用户敏感信息的身份属性需要被保护，即便是对发布者而言也是如此。保护的关键性不仅体现在确保用户对于外界攻击的隐私权上，还针对恶意的或是粗心的内部用户[2]。因此，我们需要系统能根据身份属性强制执行访问控制策略，同时确保这些属性的隐私性。Mask，本 demo 中介绍的系统，是第一个符合这些需求的访问控制系统。

Mask 由以下三个实体构成：

1. *内容发布者* (*Content Publisher, Pub*) 发布强制实施了选择性访问控制的内容。
2. 用户作为 *订阅者* (*Subscribers, Sub*) 依据证书获得发布的内容。
3. *身份提供者* (*Identity Providers, IdP*) 发布有保证的身份属性。

Mask 支持以下两个强大的隐私和安全需求：

1. 细粒度的选择性基于属性的内容访问控制。
2. 针对策略和内容消耗的用户身份属性隐私保留匹配。在 Mask 中，内容发布者不能知道哪些访问控制条件由哪些用户所验证，用户只能访问他们被授权那部分的内容。还有，内容发布者不知道用户能访问哪些部分的内容。

在 Mask 中，不同部分的内容基于访问控制策略被不同的对称密钥加密，用户只会得到他们被授权访问的内容部分的密钥。并且，密钥分发是隐私保留的，内容发布者不知道哪些用户可以得到哪些密钥。这种用不同密钥加密不同子文档，以实现选择性分发的方法不是一种新方法。然而，已有的方法既不高效又没



有隐私保留。与之相比，支持一种新的隐私保留密钥管理机制，对于一些用户的连接/离开（再续键）操作很有效率，且对其它用户没有影响。在这样的机制下，用户由一些初始秘密信息和公共变量数据获得密钥。我们的系统还取消了用户间隐私交流通道和内容发布者进行再续键操作的必要。

我们将通过一个电子医疗记录（electronic health record, EHR）[5, 1]分发系统展示 Mask 在一个医院中的应用。典型的医疗相关人员包括了不同职务的职工，如前台接待、出纳、医生、护士、药剂师、系统管理员以及非职工，如患者。以出纳举例，他除了账单信息外，没有权限访问 EHR 中的其它数据，然而医生或护士则不需要有账单信息的访问权限。在我们的 EHR 中，相关人员使用的典型身份属性有角色、位置、职位等，它们可以被用作很好的与其它公众可用信息相连接的环境信息，以便学习关于个体的可导致隐私侵犯的敏感信息。曾经有许多医院雇员窃取同事身份属性，伪装成同事进行高度危险的内部攻击的先例[2]。我们的系统是减少此类身份盗窃案件发生的很有希望的一步。

本文的其余部分将如下组织。第二部分介绍 Mask 和它组件的概述。第三部分具体描述了 demo。

## 2. 技术细节

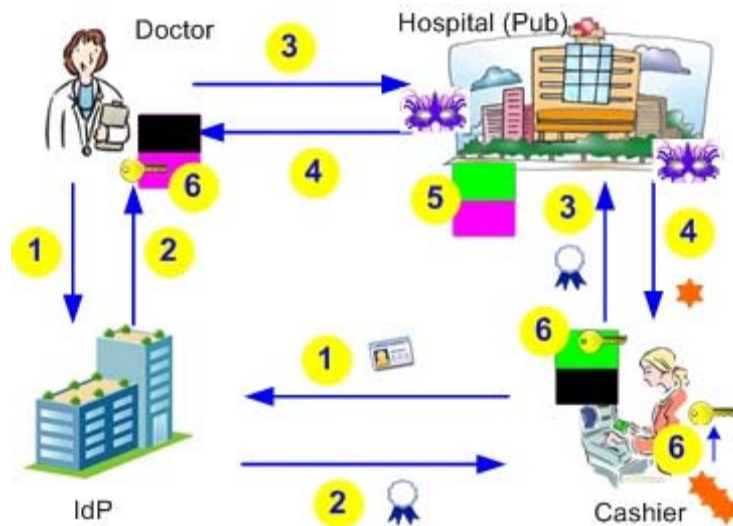


图 1: Mask 系统概览

图 1 展示了一个使用了 Mask 的 EHR 分发系统的概览。正如在上一部分中提

到的，Mask 由三个实体组成：一个内容发布者，订阅者，以及身份提供者，分别简称为 Pub, Subs 和 IdPs。

主要的交互有：

1. Sub 将身份属性的证明交给 IdP。
2. 如果 IdP 相信 Sub 的身份属性（身份提供者如何相信的问题超出了本文的范畴。我们在另一个项目中开发了多因子身份认证技术，假设那些技术可以用于此处。——作者注），IdP 为每个这样的身份属性发出一个身份令牌（*identity token, IT*）。我们假设每个 IdP 发出的令牌都拥有相同的格式  $IT=(nym, id-tag, c, \sigma)$ ，其中 *nym* 是系统中为了唯一识别 Sub 的名称，*id-tag* 是考虑之中的身份属性标签，*c* 是一个对身份属性值的 Pederson 承诺（Pederson 承诺是一种加密的承诺，允许用户在保持一个值隐藏的时候承诺之，保存了用户在之后显示承诺值的能力。详见[3, 4]——作者注）， $\sigma$  是 IdP 对 *nym*, *id-tag* 和 *c* 的数字签名。
3. Subs 与 Pub 注册，以连接发布的被编码成文档的内容。在注册过程中，Subs 首先检索 Pub 的访问控制策略，每个策略都有 (*subject, policy-id*) 的形式，也访问策略配置 (*policy configurations*)，每个策略配置都是一些访问控制策略的析取。每个由 *policy-id* 标定的访问控制策略的主语，都是身份属性条件 (*identity attribute conditions*) 的连接。身份属性条件的格式是  $cond=(id-tag\ op\ l)$ ，其中 *op* 是诸如 =, <, >, ≤, ≥, ≠ 的比较操作符，*l* 是一个身份属性可以通过 *id-tag* 标签假设到的值。一个策略当且仅当所有的身份属性条件都满足时才被满足。一个拥有两个身份属性的示例策略是 (“*level* ≥ 58” ∧ “*role* = nurse”)。对于每个文档，策略配置指定了哪些访问控制策略与文档中的哪些子文档相连接。为访问一个子文档，Sub 应当可以满足子文档策略配置中的至少一个策略。在确定了满足哪个策略配置后，Sub 通过 OCBE 协议[3]显示出它需要的身份令牌。注意到在这个过程中，Pub 既不知道 Sub 的属性也不知道对应条件的满足与否。另一个重要的课题是基于 Sub 注册条件的接口需要多少隐私才足够。如果 Sub 只为与自己希望访问的子文档相关的那些条件注册，Pub 可以推断出 Sub 的确定身份属性。因此，为了最大化隐私，Subs 需要为所有拥有相同 *id-tag* 的条件注册。例如，“*role* = nurse”和“*role* = doctor”有相同的 *id-tag* *role*，所以一个 Sub 将会注册这两个条件，即便它哪个都不能满足。我们使用记号 (*m, n*)-Privacy 来量化隐私需求，其中 *n* 是系统中拥有同样 *id-tag* 的条件总数，*m* 是 Sub 注册的条件数目。当 *m* 趋近于 *n* 时，Sub 的隐私等级增加，同时 Pub 的开支增加。对于上面的例子，(2, 2)-Privacy 对于 *id-tag* “*role*”提供了对于此身份属性的最大化隐私。
4. 对于注册过程中从 Sub 得到的每个身份令牌，Pub 会发送一个条件订阅秘密 (*conditional subscription secret, CSS*)。Subs 使用 CSSs 来得到子文档的解密密钥，以满足策略配置，CSSs 被新的 Mask 密钥管理架构所管

理，称为 GKM 架构。注意到 Subs 当且仅当他们发送了一个有效身份令牌后，才能从响应消息中获得 CSS。

5. Pub 用同样的对称式密钥，加密具有同样策略配置的子文档，并用确定的元信息发布文档，用于步骤 6 中的密钥获取。
6. 满足一个或更多策略配置的 Subs 可以获取对应子文档的对称式解密密钥。

我们接下来简要讨论 Mask 的三种实体和它们进行的操作：

- IdPs 将身份令牌发布到 Subs。对于每个身份令牌的发布，IdP 执行两个主要的计算：Pederson 承诺的计算和数字签名。
- Subs 处理三个阶段：获得身份令牌，获得 CSSs，查看子文档。对于每个从 IdP 得到的身份令牌，Subs 验证 Pederson 承诺和数字签名。对于每个 Subs 希望满足的条件，他都从 Pub 处获得一个 CSS。为了隐私的目的，Subs 可能会注册拥有同一个 id-tag 的多个条件。为了查看子文档，Subs 执行一个廉价的向量内积和一个对称式密钥解密，其中密钥是内积的结果。
- Pub 处理系统中所有的集中式计算操作。在下面的内容中，我们提供了对操作和 Pub 四个主要组件的简明技术概述，这四个组件是：策略管理器，OCBE 模块，GKM 模块和文档管理器。

*策略管理器 (policy manager)* 管理属性、条件、访问控制策略和策略配置。它被设计成一个关系型数据库应用，其中的依赖关系被强迫成为键约束。Mask 提供一个图形用户界面 (Graphical User Interface, GUI) 以方便地管理它们。

*OCBE 模块 (OCBE module)* 负责 Subs 的注册。回想在 OCBE 协议的过程中，Subs 收到用来获取解密密钥的 CSSs。我们假设每个 Sub 在全系统中有一个独立不变的名称 nym。该模块管理被送达到每个 nym 和每个 cond 的 CSSs 的表。Mask 为 Subs 提供了一个应用程序接口 (Application Program Interface, API) 来与 Pub 交互，并以隐私保留的方式获得 CSS 们。

*GKM 模块 (GKM module)* 实现了我们的 GKM 架构。对于每个子文档，GKM 模块构建了一个如[3]所述的 CSSs 的矩阵 A，之后由矩阵 A 的零空间计算出一个随机向量 Y。我们称这样的向量 Y 为 *访问控制向量 (access control vector, ACV)*。

*文档管理器 (document manager)* 管理访问控制策略与子文档和加密子文档的联系。一旦策略设置好之后，它会自动得出文档需要的最少的策略配置数目。对于每个策略配置，它会分配一个唯一的对称式密钥 K，将 K 和 Y 编码成向量 X，其中的 Y 已经是计算出的 ACV。加密文档被放在任何 Sub 都能访问到的公共位置。

一个加密的子文档有以下的 XML 格式：

```
<subdoc-i>
<payload>encrypted subdocument</payload>
<timestamp>time</timestamp>
<encoded-key>ACV</encoded-key>
<randoms>Random values</randoms>
</subdoc-i>
```

其中的<payload>元素包含了用对称式密钥 K 加密的子文档。<timestamp>元素记录了加密的时间。<encoded-key>元素包含了 ACV。<randoms>元素包含了用于生成 ACV 的随机值。Subs 使用这些随机值计算 KEV 并得到密钥 K。

加密的 EHR 文档由病人唯一的代号 patient-id 命名。例如，EHR\_patient-99.xml 是 patient-id 为 patient-99 的病人的 EHR。一个文档的子文档当得到升级的时候以增量式被加密。第一次使用时，Subs 会得到完整的 EHR 文档，但是在随后的请求中，根据 Subs 的时间戳，只需要得到升级过的子文档。如果同一条记录被频繁浏览，这会潜在地节省许多带宽。

### 3. 示例程序

Mask 将通过使用 EHR 分发的场景来展示。我们使用 C/C++和 Java 1.6 在一台 GNU/Linux 核心，版本 2.6.28，数据库为 MySQL5.0 的电脑上实现了 Mask。我们用合成的数据填充系统，展示其功能。在 demo 中我们会展示（但不限于）Mask 的以下功能：

**获取身份令牌:** 我们会展示 Subs 如何从 IdPs 处获得身份令牌。

**管理策略:** 我们会展示如何从身份属性定义的仓库开始创建策略，以及如何使用我们的 GUI，在保证一致性的同时更新/删除已有的策略。例如，如图 2 的弹出添加/删除条件窗口显示了访问控制策略 *acp4* 在当前有两个条件”role=nur”和”level≥59”。

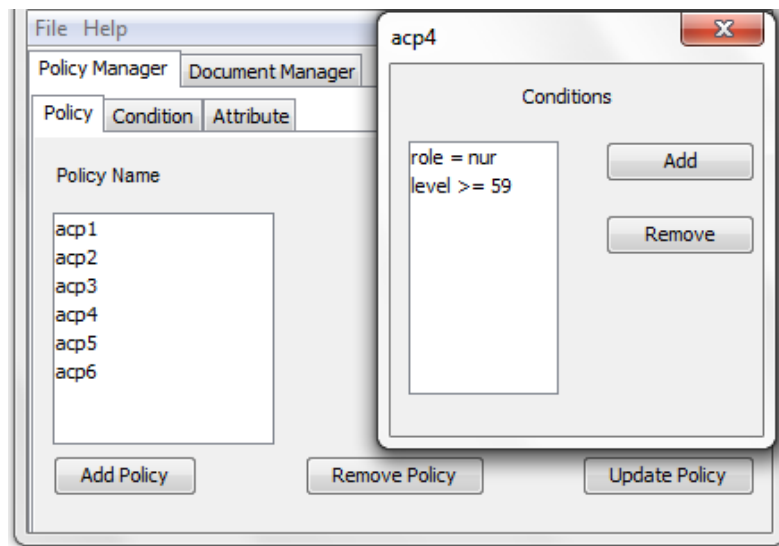


图 2: Mask 中的策略更新例子

**管理文档:** 我们会展示策略配置是如何自动生成，并根据文档特定的访问控制策略与子文档连接的。文档管理器 GUI 允许编辑和查看这些连接。例如，图 3 中高亮的行显示了策略配置 *PC4* 由 *acp3* 和 *acp4* 两个策略组成，适用于 `<PhysicalExam>` 和 `<Plan>` 两个子文档。

一旦文档被子文档化，我们还会展示如何为每个子文档生成 ACV 及用对称式密钥加密。

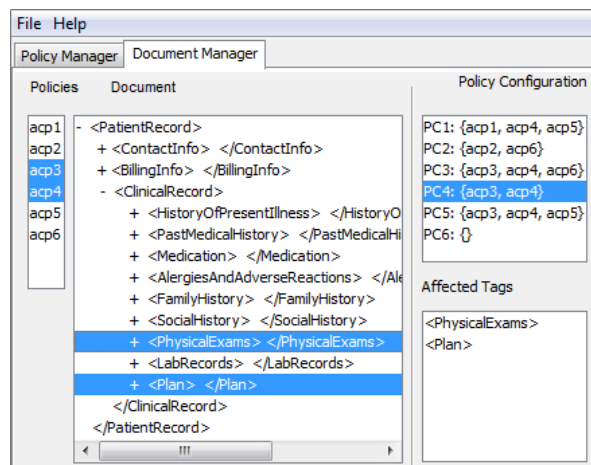


图 3: Mask 中的文档策略更新例子

**获取 CSSs:** 我们会展示 Subs 如何使用他们的身份令牌以隐私保留的方式获得 CSSs。特别地, OCBE 的步骤也将被展示。

**访问文档:** 我们会展示 Subs 是如何根据时间戳访问新的和更新过的加密文档。Subs 可以在子文档的粒度下下载更新。

并且, 在 GUI 和命令行工具的帮助下, 我们将展示 Mask 选定组件的内部工作。

#### 4. 结论

通过强制实施基于身份属性的访问控制策略, 同时保证用户身份属性的分发内容给用户组的问题在之前还从来没有得到处理。我们展示了 Mask, 一个实现了解决这种问题的方法的系统, 并应用在 EHR 共享的场景之下。

#### 5. 参考文献 (略)