

## 摘 要

自 90 年代以来,我国电力信息化上了一个新的台阶。然而目前电力系统还不能实现无缝通信,首要的问题是缺乏一个统一的规程、协议。国内外对此已进行大量研究,如美国电力科学研究院 (EPRI) 制定了 UCA (实用通信体系, Utility Communication Architecture), 为电力通信系统对象建模开辟了新的篇章, 国际电工委员会 (IEC) 将其定为国际标准, 并且成立 IEC 61850 作为电力无缝通信统一模型。但是这种模型还不完善, 其主要问题是缺少理论上的证明, 主要靠厂家提供产品从实践中获得经验。

电力线通信已成为国内外电气工程、网络工程等领域的热点研究课题。传统的 PLC 调制算法往往不能对付电力线的强干扰, 带宽还不能与电信宽带的接入技术相比拟。为此, 电力线通信技术正趋向于采用多载波调制和扩频通信技术。

本论文针对上述问题系统地开展研究, 主要贡献包括:

通过分析国内外各种通信协议体系的理论研究成果, 首次提出了基于调度层、网络层、网元层和点设备层的 4 层电力无缝通信结构; 首次提出采用 Petri 网定义、分析和描述电力系统无缝通信模型, 给出了基于 Petri 网的电力通信无缝一致模型, 弥补了传统的电力通信模型缺乏统一数学语言描述的不足。

分析了以往基于 OFDM 调制技术的 PLC 的不足, 结合 CDMA 技术提出了一种新的更加适合于电力系统环境下的电力线载波通信调制技术 (OFDM-CDMA)。从理论上证明了本方法能够获得更高的数据传输速率, 从而能提高电力系统通信效率。

结合 OPN (对象 Petri 网) 的优点, 采用 OPN 对 TASE.2 协议建模, 提出了一种采用面向对象技术的电力系统信息模型 ( $O^2$ PSIM), 并以组建的广州调度数据实验网为例, 采用 CPN Tools 进行了仿真, 仿真结果与现场测试结果相符, 为今后建设调度数据网奠定了理论基础和实践依据。

变电站通信协议的不统一, 导致了各种设备之间的不兼容性。解决这一问题的关键是建立统一的网元 (如变电站) 模型。本文采用 UCA 面向对象方法建立统一网元模型。分析了 UCA 现场通信设备在变电站的具体应用和详细的数据映射及过渡方案, 并提出了 UCA 数据通信模型在变电站现场通信设备的实现过程。

关键字: 电力系统通信; PLC; CDMA-OFDM; UCA; Petri 网

## Abstract

Since 1990s, the applications of information technologies in power network in China are taking a new trip. However, the power network is still far away from a seamless communication network. No general standard or protocol is developed. Recently, the American Electric Power Research Institute (EPRI) issued the Utility Communication Architecture (UCA) for power network, which is latterly extended by the International Electric Committee (IEC) to be an international standard. Now the UCA absorbs lots of research attention. However, the UCA lacks theoretical analysis. The Architecture is an experimental result from the practical application.

Another key problem in power network communication is the Power Line Communication (PLC). Power line is quite different with the traditional communication media used in existing communication networks. It is reported that the newest technique of PLC only promise a transmission rate of 45Mbps, which is by far lower than that of Ethernet (100/1000Mspb). Therefore, the PLC needs further research to meet the practical requirement.

In the dissertation we focus on the mentioned problems. Our contribution includes:

We propose a new 4-layers (the dispatch layer, the network layer, the net unit layer, the point equipment layer) architecture for seamless communication based on the power network. Theoretical analyses of the new architecture are also provided. We throw the emphases in analyzing various key technologies on information theory between substation and control center.

Power industry communication market is one of the power industry information components. PLC access technology application is wider and wider on the market. However, in view of its various characteristic such as noise disturbing, the traditional PLC access technology can not achieve the higher speed of access market, and it is the disadvantage in competition on market. This thesis analyzes the shortcoming of PLC technology based on OFDM technology at present. And then combining CDMA and OFDM technology and propose a new PLC modulation and demodulation technology (OFDM-CDMA), which can achieve higher transfer speed in theory, and its effectiveness illustrated by computer simulations.

We use the Object-oriented Petri Net (OPN) to model the TASE.2 protocol.

Based on the theory of petri net, we show that the dispatch data network can be analyzed theoretically and simulated with computer simulation. We also show that the practical result is quite anlynous to the computer simulation result.

Substation communication protocol's disuniform result in incompatibility of many kinds of the communication equipment made by different companies. The key problem is that the substation object-model is different. In this dissertation we detailedly analyses object-oriented power big object, and combines UCA object-oriented model's characteristic, proposes a UCA device's application, data mapping and intergrading plan. Finally propose UCA data model's actualizing process.

**KEYWORDS:** Power System Communication; PLC; CDMA—OFDM; UCA; Petri net

# 华南理工大学

## 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：周乐章 日期： 年 月 日

## 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权华南理工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、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

保密，在\_\_\_\_年解密后适用本授权书。

本学位论文属于

不保密。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：周乐章 日期： 年 月 日

导师签名：韦岗 日期： 年 月 日

# 第一章 绪 论

## 1.1 电力通信发展概述

自新中国成立以来,经过几十年的努力,中国电力工业得到了很大的发展,其发电、装机容量均居世界前列<sup>[1-3]</sup>。原国家电力公司是一个超大型国有企业,2002年发电装机容量达35300万千瓦,发电量近1.4万亿千瓦时,居世界第二位。随着通信和信息技术的发展,我国近年来已经形成了七大互联互通的电网,如华东、华中、华北、东北、西北、西南、广东,目前华北电网和东北电网已经实现互联互通,随着西电北送工程、三峡工程的陆续开工建设,广东电网与西南、华中电网、华东电网与华中电网、华北电网与西北电网都将互联互通,相信再过若干年覆盖全国的统一的大电网最终将形成。并且,随着国际合作的开展,国家有关部门在研究与相关邻国开展合作。而且,近年来,我国开始打破电力行业的垄断,准备分拆国家电力公司,进行厂网分开。这与国际上电力系统行业正朝着大电网、大开放方向发展是相一致的。90年代以来,欧洲和北美等各国都纷纷进行电力行业的改革,其主要特点是电网大互联和打破垄断。就西欧来说,其电网已经跨国界,在整个西欧互连互通,美国的西部电网、中部电网、东部电网等,并且加拿大和美国已经联网。而且,近年来,欧美各国都纷纷进行电力改革,其目标是在电力行业引入竞争,打破垄断,提高效率,为此在电力行业的各个环节如发、输、配、售等对外开放引入竞争<sup>[4]</sup>。

国内外出现电网互联和对外开放两大趋势的主要推动力是:国际民营化潮流和技术尤其是通信技术的发展。正是通信技术的发展使得电网互联互通成为可能。

### 1.1.1 我国电力通信网的发展

电力通信网是为保证电力系统的安全稳定运行应运而生的,它同电力系统的安全稳定控制系统、调度自动化系统被人们合称为电力系统安全稳定运行的三大支柱。由于电力通信网对通信的可靠性、保护控制信息传送的快速性和准确性具有极严格的要求,并且电力部门拥有发展通信的特殊资源优势,因此,世界上大多数国家的电力公司都以自建为主的方式建立了电力系统的专用通信网<sup>[5]</sup>。

刚开始,发电厂和变电站内的智能设备较少,并且它们都独立完成某一个功能,互不连通,这时的通信是以调度电话的形式出现的,因为电力系统运行需要统一调度。随着计算机和通信技术的发展,越来越多的智能设备出现在厂站内,

而且它们之间都有通信要求。后来，电力系统通信发展到远动阶段，出现了电力调度通信“四遥”的说法，即遥测，遥控、遥调、遥信，分别完成模拟量采集、模拟量调节、数字量采集、数字量控制的功能。到了 20 世纪 80~90 年代，我国电力通信已涉及电网调度自动化、电力负荷控制、计算机辅助设计、计算机仿真系统等的使用。20 世纪末，电力通信进一步发展到综合应用，由操作层向管理层延伸，各级电力企业开始建立管理信息系统，实现管理信息化。以电力通信网为基础的业务不再仅仅是最初的程控语音联网，调度实时控制信息传输等窄带业务，逐渐发到同时承载客户服务中心、营销系统、地理信息系统(GIS)、人力资源管理系统、办公自动化系统(OA)、视频会议、IP 电话等多种数据业务，电力通信网的结构也已从单一服务于调度中心的情况下，而产生的简单星型方式，发展到今天的多中心的网状网络。

我国的电力通信网经过几十年的建设，已经初具规模，通过卫星、微波、载波、光缆等多种手段构建了一个以北京为中心覆盖全国 30 个省市的立体交叉通信网。整个中国电力通信的发展，从无到有，从小到大，从简单技术到当今先进技术，从较为单一的通信电缆和电力线载波通信手段到包含光纤、数字微波、卫星等多种通信手段并用，从局部点线通信方式到覆盖全国的干线通信网和以程控交换为主的全国电话网、移动电话网、数字数据网，无不展现出电力通信发展的辉煌成就。

## 1.2 电力通信发展存在的问题

### 1.2.1 电力通信的结构

电力通信系统在拓扑结构通常采用分层分布式结构<sup>[6]</sup>。

#### 一、 现场智能控制装置的通信。

电力系统由两个大的方面组成，负责电力生产、传输的设备，如发电机、变压器，电力线，也就是我们常说的一次设备，保证电力生产、传输、分配安全、高效进行的装置和设备，如电机，传输线等各种保护设备，电机的励磁调节等各种调节和控制设备，调节电力分配的各种配电设备等，也就是我们常说的二次设备。随着电力自动化改造的深入，电力系统的二次保护广泛采用微机式继电保护，各种各样的微机继电保护装置、控制装置在完成现场保护和控制的的功能的同时，还由于诸如某些保护和调度算法的原因而要求其他装置的数据，以及当地中心监控要求得到各智能装置的各种测量、状态量等数据的原因，在变电站现场各智能装置之间以及各智能单元与监控中心之间存在大量的通信。这一级通信由于在现场干扰比较大，同时涉及控制，要求实时性高、准确性高，但是这一级的数据量

不大，要求通信速率不高。

## 二、 现场智能控制器与远方调度的通信

现场智能装置还要求和远方调度进行通信，以实现电力要求的“四遥”。这一级通信的特点是：数据流量相对较大，但是实时性要求较低。

## 三、 调度中心之间的通信

不同调度中心(或调度自动化系统)之间要进行大量的数据交换，通信实现手段通常是铺设专网，采用标准协议。这一级对于实时性的要求相对来讲已经较低，但是数据流量是非常大，而且要求安全性很高。

### 1.2.2 “孤岛”问题

虽然我国电力通信网的建设已有了一定的规模，网络已普遍建立，但电力通信存在一个重要问题：信息“孤岛”问题。对于电力企业的各种通信系统，基本都是独立建设的，技术体系各不相同，数据采集、接口不一，逐渐形成信息“孤岛”，如图 1-1 所示，每个子系统如控制中心、企业、电厂、输电变电站、配电变电站、用户接口、其他发电厂之间只认识自己的系统和数据，相互之间的信息互通互连比较困难，需要各种通信协议的转换，造成了资金很大的浪费<sup>[7-8]</sup>。



图 1-1 电力系统信息“孤岛”示意图

Fig. 1-1 Information isolated island in power system

#### 1.2.2.1 控制中心之间通信孤岛

基于控制中心所实现功能的不同，从层次化体系结构的角度可将控制中心分为三个层次：地域控制中心（Area CC）、区域控制中心（Regional CC）和国家控制中心（National CC），其层次化体系结构见图 1-2。

ACC 可基于本地域需求拥有多个 DACS, 其中, 每个 DACS 连接不同的 RTUs 群组。DCAS 与 RTUs 的连接可采用星型结构; ACC 和 RCC、NCC 之间基于交换机 (ATM)、路由器 (网关) 和通信链路 (光纤网、有线或无线中继网) 实现互联互通, 构成基于广域网 (WAN) 条件下的控制中心层次化体系结构。

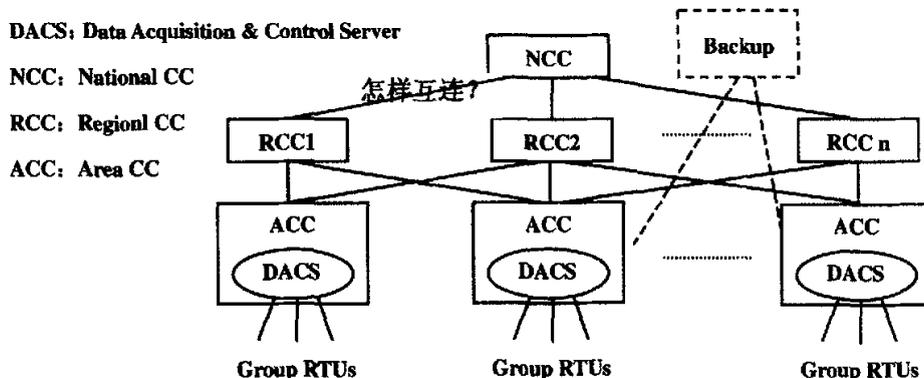


图 1-1 控制中心层次化体系结构

Fig. 1-1 Control center hierarchy

图 1-2 中看到各个层次的 EMS 系统, 由于发展时间不一样, 老的系统分布式处理能力和功能有限, 各个企业 (公司) 内部实时和非实时的数据库应用系统、实时数据采集设备或子系统等相对独立, 从而形成多“信息孤岛”模式下的控制中心。这种模式下的控制中心在未来电力系统的决策层、电子商务层和内部运作层上实现信息的实时集成、共享与分发都是十分困难和复杂的, 并将严重阻碍大电网互联条件下的实时信息交换, 也不适应电力系统的发展趋势。

各个控制中心之间通信表现出以下一些突出的问题:

- 他们采集的实时数据不能共享。他们之间通常只能与个别子调度联网, 双方可以通过计算机通信交换信息, 大部分调度中心之间是没有实现联网的, 制约了各级调度中心进一步开展高级应用功能的应用, 限制了整个通信自动化系统的应用水平提高;
- 随着 EMS 系统的发展, 一些新的应用所需的新的数据不能得到, 而且系统扩展性较差, 实时数据得不到及时的更新; EMS 系统的非实时数据不完全;
- 与新上的电力市场技术支持系统不能融合, 或许说根本上不能开展新的系统应用。

### 1.2.2.2 厂站与控制中心远动通信

传统的远动通信如图 1-2 所示。

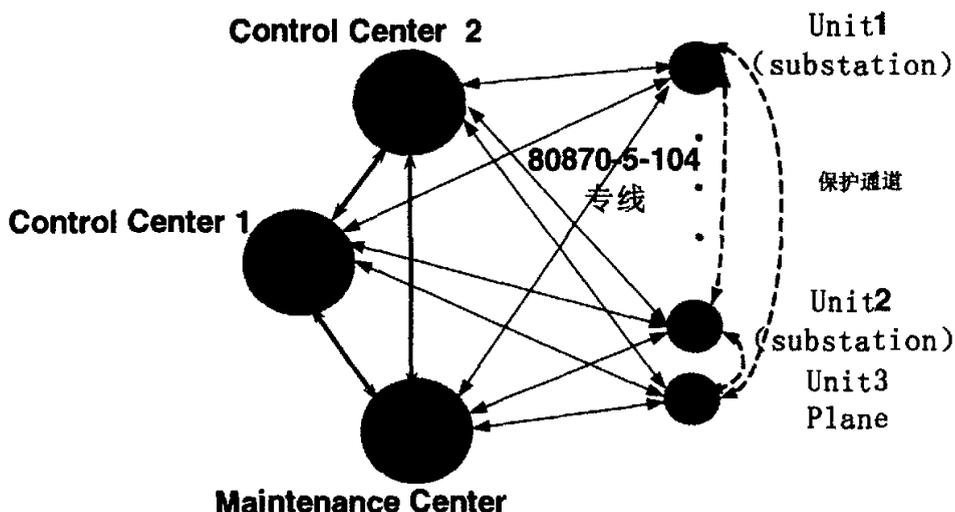


图 1-2 远动通信系统连接图

Fig. 1-2 Interlinkage of telecontrol communication system

其缺点主要如下：

- 硬件开销：每一个控制中心（这里按 3 个上级控制中心）需要采用一对一的方式接入每一个网元系统，共需要开设  $3+3\times N$ （ $N$  为子站数量）个通道，设备费用高，浪费传输通道。
- 而且随着变电站保护设备对通信的需求，设相邻的变电站必须提供保护专用通道，按照每个变电站平均有  $M$  条出线（相邻变电站高压线互连），则需要  $(N/M) * M(M-1)/2$  个互连通道。
- 传统的远动数字信道模拟使用，高速信道低速使用，中间环节多，延时严重，出错机率大。
- 软件投资：各家系统使用的远动协议或网络协议的不同，通信软件五花八门，软件调试费时费力，软件重复投资现象屡见不鲜。

尽管目前远动通信在国内大部分都采用 IEC 60870-5-104 协议，但是 104 一些固有的一些缺点不能解决今后对于数据的扩展性要求。而且 104 协议是属于字符型协议，其扩展性、可读性远远不如面向对象的协议格式。

### 1.2.2.3 变电站内部通信

由于商业和技术的原因，在变电站内部通信世界上出现了多种现场技术并存的局面，而各种总线在技术上是大同小异的，技术上非常接近。通常有 Profibus、Modbus、Lonwork 等主流总线技术<sup>[9-12]</sup>。现场总线的有它自身的一些优点，它克服了传统的 DCS（Distributed Control System，分布式控制系统）系统中通信由封闭的专用网络系统实现中所产生的缺陷，把集中与分散相结合的 DCS 集散控制结

构，变成新型的全分布式结构，把控制功能彻底下放到现场，依靠现场智能设备本身实现基本控制功能。各种总线也自身定义了自己的数据模型，都有自己的 OSI 的 1~7 层协议模型，因此各个支持现场设备的互操作性，受到严重的挑战。

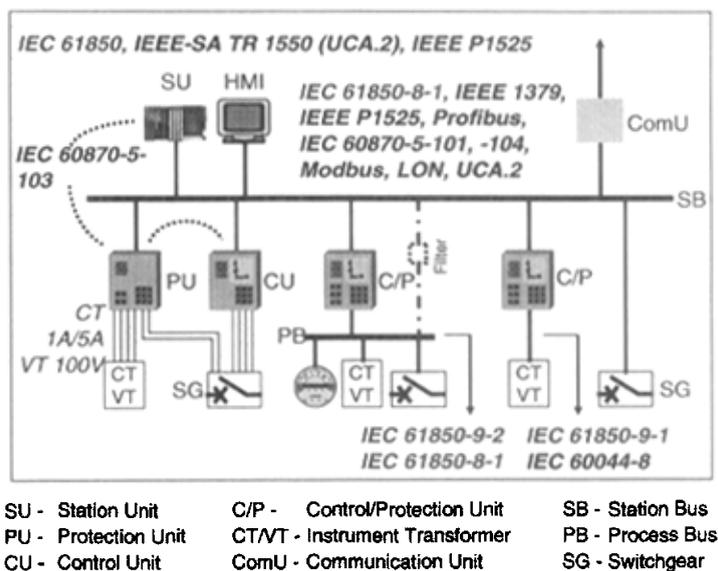


图 1-3 变电站内部通信规约一览

Fig. 1-3 A view of communication protocols inside substation

变电站中各个层面的通信协议如图 1-3 所示。变电站内部通信的问题主要也是变电站通信协议的统一性。通常情况下电力企业用户一般都不愿意因曾经购买某一厂商的产品，而今后为了与这一产品兼容必须购买这个厂商的其他产品，甚至是质量明显不如其他厂家。因此研究统一的一个通信协议将显得非常重要，拥有设备的互操作性，各厂家就可以如愿的购买其他厂家在某一方面性价比最好的商品，而不必受到技术上不能互联的问题。

### 1.2.3 电力通信国际标准

克服上述通信信息“孤岛”的关键解决办法是建立一个统一的模型，制定一个行业标准，从而克服目前众多通信协议不统一的情况，来解决所有的各个系统之间的互通互连，以达到无缝通信的目的。

国际电工委员会(IEC)第 57 技术委员会(电力系统控制和通信)自 1964 年成立以来，一直致力于制定遥控、远方保护和电力系统控制方面的国际标准。随着计算机应用水平的提高，EMS(Energy Management System,能量管理系统)、SCADA (Supervise Control and Data Control,监控控制数据采集)、变电站自动化在电力系统得到大量应用，不同控制设备和系统越来越多的集成在一个总的控制系统中，

需要交换大量的信息和数据,这样,由不同厂家生产的不同设备之间通信规约的问题便突出出来,IECTC57自八十年代初就成立了一个工作组WG03专门进行远动设备和系统传输规约方面的编制工作,并于九十年代初陆续发布了一系列国际标准。这些标准中的服务和规约采用开放系统互联(OSI)的七层参考模型(包括物理层、数据链路层、网络层、传送层、会话层、表示层、应用层),为广泛应用提供了很大的灵活性。

随着科学技术的发展,IEC57不断发布新的电力通信标准,下面简单介绍几种重要标准。

### 1、IEC60870-5 系列

IEC60870-5通信标准是WG03基于EPA(增强型)结构而在1990年后逐步制定的远动通信协议。IEC 60870-5-101(下称101规约)是遵循IEC 60870-5定义的一个真正可使用的规约,它针对IEC 60870-5基本标准中的FT1.2帧格式,对物理层、链路层、应用层、用户进程作了大量具体的规定和定义。我国在1998年5月制定了电力行业标准DL/T 634-1997基本远动任务的配套标准,非等效采用101规约,并根据国情作部分选择和补充。这些标准的推出,为电力系统产品的互联及我国电力行业与世界同行的技术交流与合作提供了很大的便利。

传统的远动通信规约一般不分层,WG03定义的远动通信协议分为两层:链路层,由IEC 60870-5-1和IEC 60870-5-2描述;应用层,基础部分由IEC 60870-5-3,IEC 60870-5-4,IEC 60870-5-5描述。网络层、传输层、会话层、表示层都为空层,应用层直接映射到链路层,其应用层采用无连接方式,根据应用领域定义了一系列“伙伴标准”:IEC 60870-5-101用于常规远动,IEC 60870-5-102用于电量计量信息的接入,IEC 60870-5-104将IEC 60870-5-101用在TC/IP网络协议上。

### 2、UCA 协议

EPRI(美国电力科学研究院)发起了IUC(Integrated Utility Communication)项目,1988年,EPRI联合PG&E(Pacific Gas and Electric)及HL&P(Houston Light and Power)发布了UCA1.0协议,用于电力系统自动化领域。由于UCA1.0不完善,内容不详细,缺乏互操作性,加上参与的单位较少,因此没有得以推广。随着国内外公用事业市场的开放和改革,各界对公用事业信息的通信提出了越来越高的要求,这样,便开始制定UCA2.0协议。UCA2.0主要内容包括控制中心之间通信和变电站内部的通信协议。控制中心采用IEC60870-6的TASE.2标准,该标准分为3章,分别为:IEC870-6-503:Services and Protocol; IEC870-6-802: TASE2.0 Object Models; IEC870-6-702:TASE.2 Application Profile。这3章和UCA2.0其他部分都是独立的。UCA2.0的其它部分是作为厂站智能设备交换数据用的,将有4章,分别为:UCA Common Application Service Models(CASM); UCA Generic Object Models for Substation and Feeder Equipment (GOMSFE); UCA Customer Interface Device

Models (CIDM);UCA Power Plant Device Models(PPDM) 。对于控制中心和变电站之间的远动通信,在目前的UCA版本中没有确定的模型,只提到可采用TASE.2标准和馈线设备对象模型(GOMSF E)<sup>[13-15]</sup>。

UCA从数据对象、对象服务描述了各种电力系统中的各种状态,推荐采用XML语言对对象进行描述,并实现各种数据之间的互通互连。UCA面向对象模型建模的特点,支持各种通信网络的应用,已经被IECTC57工作组采纳,吸收成为IEC61850的一部分。UCA正向着国际化方向发展。

### 3、ICE61850

为适应变电站自动化技术的迅速发展,1995年IECTC57为此成立了3个工作组10,11,12(WG10/11/12),负责制定IEC61850标准。工作组成员分别来自欧洲、北美和亚洲国家,他们有电力调度、继电保护、电厂、操作运行及电力企业的技术背景,其中有些成员参加过北美及欧洲一些标准的制定工作。3个工作组有明确的分工:第10工作组负责变电站数据通信协议的整体描述和总体功能要求;第11工作组负责站级数据通信总线的定义;第12工作组负责过程级数据通信协议的定义。这3个工作组参考和吸收了已有的许多相关标准,其中主要有:IEC870-5-101远动通信协议标准;IEC870-5-103继电保护信息接口标准;UCA2.0;ISO/IEC9506制造商信息规范MMS。

IEC61850体系对变电站自动化系统的网络和系统做出了全面、详细的描述和规范。是关于变电站自动化系统的第1个完整的通信标准体系。与传统的通信协议体系相比,在技术上IEC61850有如下突出特点:

- 1、使用面向对象建模技术;
- 2、使用分布、分层体系;
- 3、使用抽象通信服务接口(ACSI)、特殊通信服务映射SCSM技术;
- 4、使用MMS技术;
- 5、具有互操作性;
- 6、具有面向未来的、开放的体系结构。

#### 1.2.4 电力无缝通信体系

IECTC57于2000年6月6日召开会议,决定以IEC61850为基础构建无缝远动通信体系结构,SPAG(Power System Control and Associated Communication,电力系统控制及其通信技术委员会)会议提出了IECTC57远动的无缝通信体系结构方案,如图1-5所示,变电站内、变电站到调度所之间的协议都是IEC61850,或者说从过程层到间隔层、从间隔层到变电站层、从变电站到控制中心都是采用IEC61850,数据模型从过程层、间隔层、变电站层、从变电站到控制中心的CIM

IEC61970 都是一致的<sup>[16]</sup>。

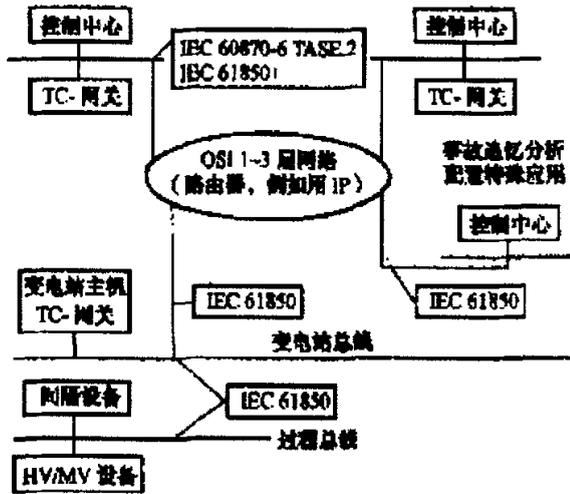


图 1-5 IECT57 运动无缝通信体系结构

fig.1-5 IECT57 seamless tele-control communication architecture

UCA 从数据对象、对象服务描述了各种电力系统中的各种状态，但 UCA 所解决的问题仅仅是从单个的系统如远动通信、变电站通信、馈线通信、控制中心之间的通信逐个地对每个对象进行阐述，缺乏统一性，整体来看是不能达到互操作性的。IEC 61850 则吸收了 UCA 的面向对象的优点，建立了变电站及馈线系统的对象模型，并且通过 CASM (Common Application Service Models) 映射到 MMS(制造报文规范)中，从而达到整个系统的最佳性能和互通性能<sup>[17-18]</sup>。但由于 IEC 61850 是采用不同系统的对象模型，所定义的模型缺乏一种数学语言来描述，也没有定义各个子系统之间的关联和关系，使得电力通信依然是“有缝”的。

## 1.3 电力载波通信

### 1.3.1 电力载波通信特点

电力线路主要是用来输送工频电流的。将话音及其他信息通过载波机变换成高频弱电流，利用电力线路进行传送，就是电力线载波通信 (Power Line Carrier, 简称 PLC)。电力线载波通信是电力系统传统的特有通信方式，具有通道可靠性高、投资少、见效快、与电网建设同步等电力部门得天独厚的优点，曾经是电力通信的主要方式<sup>[19-40]</sup>。

虽然在有线通信中，话音信号可以利用明线或电缆直接进行传送，但在高压输电线路上，由于工频电压很高(数十万、百万伏特)，电流很大(上千安培)，因此

其谐波分量也很大，这些谐波如果和话音信号混合在一起是无法区分的。例如话音信号的频率在 300Hz，工频电流的 6 次谐波也是 300Hz，而且其谐波值往往要比一般传送的话音信号大得多，对话音信号产生严重干扰，因此在电力线上直接传送话音信号是不可能的。利用载波机将低频话音信号调制成为 40kHz 以上的高频信号，通过专门的结合设备耦合到电力线上，信号会沿电力线传输，到达对方终端后，再采用滤波器很容易将高频信号和工频信号分开。而对应于 40kHz 以上的谐波电流，是 50Hz 工频电流的 800 次以上谐波，其幅值已相当小，对话音信号的干扰已减至可以接受的程度。这样，利用电力线既传送电力电流，又传送高频载波信号，称电力线的复用。电力线通信与其它各种可以入户的通信技术相比，它具有以下优点：

- 1、 光纤和局域网等通信技术，均需铺设专门的通信电缆入户，而且综合成本高。电力线通信方式利用已有的低压配电网作为信息传输的载体，从而避免了新的通信网络的建设和投资，使工程造价大幅下降，这也是电力线通信技术最吸引人的地方。
- 2、 电力线通信安装简便，只需将光纤和其他形式的主通信干线铺设至居民楼的配电间，无需入户铺设电缆，大大减轻了住户的负担，避免了对户内装修的破坏和约束。
- 3、 电力线的入户率高，覆盖范围大，在户内的插座(电力线通信口)多。
- 4、 PLC 的传输速率高。比普通拨号上网速率快几十倍。在网站 Web 服务器通畅的情况下，下载软件、大宗数据、高分辨率图片和观看网络电影，均达到满意效果。
- 5、 与计算机和其他电器设备联网方便。PLC 调制解调器具有 RJ45 和 USB 接口，与电源之间的连接更方便(使用普通电源插头)。

虽然电力线通信拥有这么巨大的优势，但是其发展却受到自身传输特性的影响，概括起来有以下几种：

#### 1、 噪声干扰强

一般来说，影响电力通信质量的噪声主要有以下三种：

背景噪声——分布在整个通信频带；

周期性噪声——包括周期性的连续干扰和周期性的脉冲干扰；

突发性噪声——用电设备的随机接入或断开而产生。

研究表明，脉冲干扰对低压电力线载波通信的质量影响最大，可达 40dB。

#### 2、 信号就衰减大

由于低压配电网直接面向用户，负荷情况复杂，各节点阻抗不匹配，所以信号会产生反射、谐振等现象，使信号的衰减变得极其复杂。据有关文献报导，信号的衰减与频率、工频电源的相位有关，一般来说，随着频率的增加，信号的衰

减也将增加。在 100~400kHz 频带内, 信号的平均衰减为 40dB, 标准偏差为 20dB。

### 3、具有随机性和时变性

由于用户负荷的随机接入和切除, 网络结构的变化以及不可抗拒的自然因素, 如雷电的影响, 使其干扰表现出很强的随机性和时变性, 从而难以找到一个准确的数学模型来加以描述。

可见, 电力线自身的特点, 大大限制了以其为传输媒介的低压载波通信技术的发展。

## 1.3.2 电力载波通信发展与现状

PLC 技术出现于 20 世纪 20 年代初期, 那时, 主要集中在 11kV 以上的高压远距离传输。到了 20 世纪 50 年代, 高压电力线通信技术已广泛用于监控、远程显示、设备保护及语音传输等领域。50 年代后至 90 年代早期的 30 多年中, 电力线通信开始应用中压和低压电力网络。20 世纪 90 年代中后期以来, 低压电力线通信成为国内外电气工程、网络工程等领域的热点研究课题。对电力线通信的研究在世界范围内, 其是在德国、韩国、美国、瑞士等国都已近于实用。英国 NORWEB 通信公司在 1990 年就开始研究该项技术, 1996 年 9 月在 CIGRE 大会期间向各国代表展示了该项技术原理和演示产品, 提供了在曼彻斯特进行 20 户小范围试验的录像资料, 传输速率达到 1Mbps, 但仅进行了小规模现场试验, 未能得到推广; 在德国, RWE 集团从 1997 年开始与瑞士的 ASCOM 公司合作开发 PLC 技术, 2000 年 5 月开始进行 200 户参与的现场试验。2001 年 7 月开展了 RWE PowerNet(PLC 高速上网)、RWE PowerSchool(PLC 学校联网)和 RWE eHome(智能建筑遥控与自动化)三项业务; 韩国 XeLine 公司在 2001 年 3 月推出 PLC 产品解决最后接入家庭网络应用的方案, 在韩国汉城建立了与互联网相连接在示范点。目前, 该公司在德国、日本、美国、中国等地建设了 PLC 试验点, 试验产品传输速率达 1Mbps; 美国公司 PLC 技术的发展模式不是接入网模式, 而是家庭联网模式, 这种模式的 PLC 只提供家庭内部联网, 户外访问使用其他传统的通信方式<sup>[22]</sup>。

与此同时国际上对 PLC 专用芯片的研制也取得了突飞猛进的发展。美国的 Intellon 公司的 14Mbps 芯片已经达到实用水平, 并于今年拟推出 100Mbps 的芯片; 欧洲西班牙 DS2 公司的芯片速率也达到 45Mbps; 目前, Adaptive、Networks、Echelon、NationalSemiconductor 等公司也已有了商业化的产品。

随着 PLC 技术的发展, 相继成立了相关的国际性 PLC 组织, 例如: 由 3Com、AMD、Cisco Systems、Compaq、Intel、Motorola、Texas Instruments 等 13

家公司组成了 HomePlug 电力线联盟 (HomePlug Powerline Alliance)、电力线通信技术论坛 (PLC Forum) 和电力线作为可供选择的本地接入系统协会 PALAS (Powerline as an Alternative Local Access) 等。目前, HomePlug 电力线联盟已有 90 家公司参与该组织标准的制定工作, 并已制定了第一个标准草案 (HomePlug 1.0 specification)。这些组织正在研究 PLC 技术标准、市场推进和政府管制政策等问题。

我国研究 PLC 技术起步较晚, 但发展速度较快。中国电力科学研究院自 1997 年开始研究 PLC 技术, 主要考虑 PLC 技术用于低压抄表系统, 传输速率较低。1998 年开发出样机, 并通过了试验室功能测试, 1999 年在现场进行试运行, 获得了产品登记许可。1999 年 5 月开始进行 PLC 系统的研究开发工作, 主要对我国低压配电网的传输特性进行了测试, 并对测试结果进行了数据处理和分析, 基本取得了我国低压配电网传输特性和参数, 为进行深入研究和系统开发提供依据。2000 年开始引进国外的 PLC 芯片, 研制了 2Mbps 的样机, 2001 年下半年进行了小规模现场试验, 实验效果良好。深圳国电科技有限公司是国家电力公司直属企业, 2000 年初就开始研制户内 PLC 产品, 目前, 采用美国 Intellon 公司的 14Mbps 芯片研制的用于户内联网的 PLC 产品也在进行小范围试验。下一步准备采用 DS2 公司的 45Mbps 芯片, 研制出速率达到 20Mbps 的户内 PLC 联网设备。此外, 福建省电力公司、清华大学、华北电力大学等单位也对此进行研究, 主要是对我国配电网信道特性等进行深入的研究, 有的完成了自己的样机并进行了小范围试验。

### 1.3.3 电力载波技术发展方向

已有的研究表明, 电力线是一种复杂的通信媒体, 无处不在的噪声、负荷变化及一些不可预测的干扰都会严重影响信号传输的质量。要保证通信质量, 提高通信速率, 选择合适的调制方式是一个关键问题。传统的单载波调制系统不适用于高速数据传输, 因为需要对信道进行多级均衡, 设备复杂且收敛性差。多载波频分复用 (OFDM—Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 技术, 以其抗干扰能力强、带宽利用率高、结构简单、成本低等优点, 为实现高速低压电力线载波通信提供了一个有效的解决方案。目前, 欧、美的许多公司及科研机构正致力于这方面的研究, 包括加拿大的 Power Trunk, 美国的 Intellon 和 Ambient Technologies。其中, Intellon 公司提出的改进的 OFDM 技术 (IcOFDM) 已被家庭插座联盟采纳, 成为制定电力线载波通信规范的依据。目前, Intellon 公司利用 IcOFDM, 已经在低压电力线上实现了 11Mbps 的高速率数据传输, 其误码率小于  $10^{-7}$ <sup>[21,23-32]</sup>。

低压电力线载波通信的另一发展方向是使用扩频通信技术<sup>[22,34-39]</sup>。采用扩频

技术，能在很大程度上克服电力线的大衰减、强干扰的缺陷，提高了通信系统的生存能力。扩频技术的真正全面研究是从 20 世纪 50 年代美国麻省理工学院成功研制的 NOMAC 系统开始的。就低压电力载波通信而言，应用扩频通信的主要优点如下<sup>[22]</sup>：

### 1、频谱密度低，电磁辐射小

扩频通信在相对较宽的频带上扩展了信号频谱，降低了信号的功率谱密度，使信号能量不再集中在一个很窄的频带，降低了电磁辐射的发射功率，降低了对其它通信系统的干扰。

### 2、抗干扰性强，误码率低

扩频通信在空间传输时所占有的带宽相对较宽，而接收端又采用相关检测的办法来解扩，使有用宽带信息信号恢复成窄带信号，对于各种形式随机干扰或其他窄带或宽带(扩频)系统的干扰，只要波形、时间和码元稍有差异，解扩后仍然保持其宽带性。这样，通过窄带滤波技术提取有用信号时，各种干扰信号只有很微弱的成份，信号的信噪比很高，抗干扰性增强。

### 3、可以实现码分多址

由于在扩频通信中存在 PN 码序列的扩频调制，充分利用各种不同码型的扩频码序列之间优良的自相关特性和互相关特性，在接收端利用相关检测技术进行解扩，则在分配给不同用户码型的情况下可以区分不同用户的信号，提取出有用信号。

## 1.4 本论文的研究意义

如前所述，在克服上述通信信息“孤岛”问题，达到电力系统无缝通信的目的，关键是建立一个统一的模型，制定一个行业标准。IEC TC57 的许多标准都是根据各种特定应用,对各种系统分别建模,不能做到完全一致。要将各种协议连接起来，就得进行转换，在采用网络技术的情况下，很难适应发展的需要。UCA 所解决的问题仅仅是单个的系统如远动通信、变电站通信、馈线通信、控制中心之间的通信，它逐个地对每个对象进行阐述，缺乏统一性，整体来看是不能达到互操作性的。IEC 61850 则吸收了 UCA 的面向对象的优点，建立了变电站及馈线系统的对象模型，并且通过 CASM 映射到 MMS 中，从而达到整个系统的最佳性能和互通性能。但由于 IEC 61850 是采用不同系统的对象模型，所定义的模型缺乏一种数学语言来描述，也没有定义各个子系统之间的关联和关系，在一个小的系统中可能可以实现无缝通信，然而当系统变得更大的时候，往往也会出现孤立的“大陆”。

本文首先根据电力系统业务特点，通过引入 Petri 网 (Petri Net)，提出了一

种新的电力系统无缝通信网络 (PSSCN, Power System Seamless Communication Net) 模型。Petri 网具有适应各种大型系统建模的特性, 而且能够建立各种分层次的模型、具有面向对象的特点, 仿真工具非常完善。鉴于它在电信界业务的成功应用, 本文把它引入到电力系统无缝通信, 以弥补传统的电力通信系统缺乏统一数学语言描述的不足。

电力线通信已成为国内外电气工程、网络工程等领域的热点研究课题。电力线载波中低压电力线载波 (PLC) 的应用目前主要在 10kV 电力线作为配电网自动化系统的数据传输通道和在 380/220V 用户电网作为集中远方自动抄表系统的数据传输通道, 还有正在开发并取得阶段性成果的电力线上网高速 MODEM 的应用, 但是要真正取得电信接入网的市场, 电力线载波通信调制技术还有待进一步的提高<sup>[49-58]</sup>。本文分析了以往基于 OFDM 调制技术的 PLC 的不足, 结合 CDMA 技术提出了一种新的更加适合于电力系统环境下的电力线载波通信调制技术 (OFDM-CDMA)。

## 1.5 论文章节的安排

第一章 全文绪论, 介绍了论文的研究背景, 分析我国电力通信网发展过程中其体系结构所存在的缺点, 阐明论文的研究意义和目的, 最后给出了论文的章节安排。

第二章 系统分析电力业务特点, 根据目前电力系统无缝通信的结构, 提出基于网元、网络级的电力系统无缝通信结构。而且分析了 Petri 网络模型的特点, 它在电信行业成功的应用表明其适合电力系统无缝通信的研究。并介绍 Petri 网的背景知识, 为后面的建模打好基础。

第三章 基于 OFDM-CDMA 技术的高速电力线通信技术, 分析目前基于 OFDM 调制技术还存在抗干扰性不强、通信速率不高等缺点, 提出了一种新的基于 M 带小波变换的 OFDM-CDMA 电力线载波通信调制算法。这种算法更加适合于电力系统强干扰的环境下工作, 有非常好的抗各种衰弱性能, 并从理论上分析它能够达到更高的数据传输速率。

第四章 目前 TASE.2 在我国网络化远动通信中的应用还存在理论依据不足的问题, 实时的信息在非实时网络中传输的可靠性完全依靠具体的实验来验证。本章结合 Petri 网能够模拟整个系统的动态和静态性能的特点, 对 TASE.2 整个协议流程进行建模, 实验结果表明 Petri 网能够详细地记录网络的性能。

第五章 通过分析我国远动通信发展的趋势, 介绍 UCA (Utility Communication Architecture) 的研究情况和 UCA 现场设备的实现过程, 并且针对我国电力系统现有现状提出了网元中点设备过渡无缝通信的各种途径及注意的问

题。

第六章 基于目前应用于运动、计量、保护等点设备的实时数据业务的调度数据网络应用还是试点阶段,根据第四章 Petri 网对调度数据网传递实时数据的可行性理论模型,采用路由器组建 DDN 广州调度数据网。测试表明其各种业务指标能够达到第四章中模拟的结果,从而从总体上进一步证实了远动通信的网络化传输的可行性方案,提高了总体的传输带宽,并为我国建设调度数据网提供了实践依据。

最后是总结全文,介绍论文的研究内容及其创新之处,对今后有待进一步解决的问题做出展望。

## 第二章 电力系统无缝通信模型

### 2.1 引言

在电力系统的发展过程中，标准往往迟于应用。各个厂家都推出富有自己特色的产品，从变电站到控制中心他们之间的各种应用产品信息都很难得到互通。IEC（国际电工委员会）对电力行业的通信提出过很多标准，全国电力企业也都在参照执行。但是随着电力信息系统网络化的发展，这些规范都不能适应时代的发展需求。这些标准在执行的过程中，由于缺少数学描述和统一的对象描述，各个产品在生产过程中也存在不同的理解，非常不利于未来产品的互通。

上个世纪 90 年代，美国电力科学研究院（EPRI）为了解决这些问题也提出了 UCA（Utility Communication Architecture）模型。它从数据对象、对象服务描述了各种电力系统中的各种状态，推荐采用 XML 语言对对象进行描述，并实现各种数据之间的互通互连。然而 UCA 所解决的问题也仅仅是从单个的系统如远动通信、变电站通信、馈线通信、控制中心之间的通信逐个地对每个对象进行阐述，缺乏统一性，整体来看是不能达到互操作性的。

IEC 61850 则吸收了 UCA 的面向对象的优点，建立了变电站及馈线系统的对象模型，并且通过 CASM（Common Application Service Models）映射到 MMS 中，从而达到整个系统的最优性能和互通性能<sup>[17-18]</sup>。但由于 IEC 61850 是采用不同系统的对象模型，所定义的模型缺乏一种数学语言来描述，也没有定义各个子系统之间的关联和关系，在一个小的系统中可能可以实现无缝通信，然而当系统变得更大的时候，往往也会出现孤立的“大陆”。

本章根据电力无缝通信思想，建立了电力系统无缝通信的网元、网络模型。为了解决电力系统无缝通信缺少数学语言统一描述的缺陷，本章提出采用 Petri 网对电力系统无缝通信进行描述。Petri 网是离散事件动态系统建模和分析的主要方法之一，是一个图形化的建模语言，可以面向对象建模，并已被广泛用在电信业务的分析和应用上。本章在研究 Petri 网的基本特性基础上，分析了采用 Petri 网描述电力系统无缝通信的优势。

## 2.2 基于网元、网络模型的无缝通信

### 2.2.1 现有电力系统无缝通信模型

目前 IEC TC57 的各种标准都是根据各种特定应用,对各种系统分别建模,不能做到完全一致。要将各种协议连接起来,或者和 SCADA 数据库连接起来,就得进行转换,在采用网络技术的情况下,很难适应发展的需要。IEC TC57 在制定 IEC-61850 标准的过程中已经做过部分工作,包括 SCADA 数据库到过程的对象统一建模,和 IEC 61970 数据模型协调一致。TC57 还要求检查 IEC 61850 的数据模型是否涵盖了 IEC 60870-5-101,IEC 60870-5-103,IEC 60870 6 (TASE.2) 的数据模型。

图 2-1 给了电力系统无缝通信体系结构<sup>[17]</sup>。

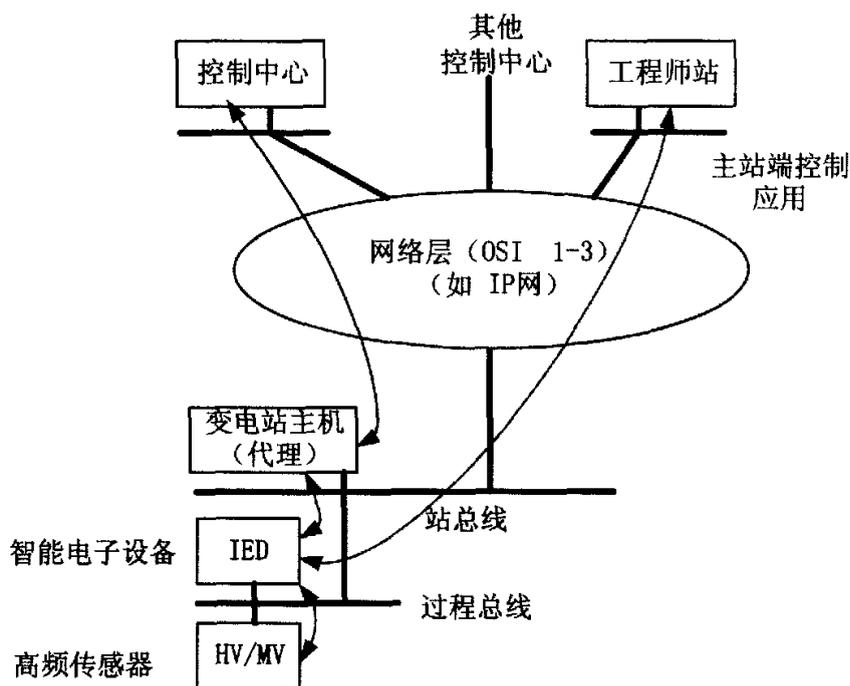


图 2-1 电力系统无缝通信体系结构

Fig. 2-1 Seamless communication architecture in power system

图 2-1 中采用网络实现控制中心 (Control Center)、工程师站 (Engineering Station)、变电站主机 (Substation Host), 和变电站中智能电子设备 (Intelligence electric Devices, IED)、高频传感器 (HV/MV) 设备之间的无缝通信。

但是这个无缝通信体协结构只是一个理想化的模型,具体的实现方式目前正在研究之中。目前这种模型缺乏数学工具的描述,将来很难被厂家所接受。

## 2.2.2 基于网元、网络模型的无缝通信

根据对电力系统无缝通信体系结构的理解，结合电力通信业务特点，同时借鉴电信网结构，我们提出了基于网元的电力无缝通信模型，如图 2-2 所示，该模型把整个电力无缝通信系统分为四层：调度层、网络层、网元层和点设备层。

- ✓ 调度层主要由主站即控制中心和它的各种应用组成，操作层主要负责整个系统的计算、决策、收集信息及控制全网功能。
- ✓ 网元层则是由人机接口、输配电变电站、风力发电厂、火力发电厂、水力发电厂等各种应用网元组成，网元的作用负责采集点设备层信息并上送到操作层使用。网元层这里相当于一种代理的功能。
- ✓ 点设备层则包括各个网元系统中各种保护设备、控制设备、测量设备等各种智能电子仪器。他们之间通常通过总线有着自己的通信，并且把有用的测量信息送至控制中心。
- ✓ 网络层则是为以上各层提供的通信信息通道，它通常都采用各种网络技术来实现，如 TCP/IP 等。

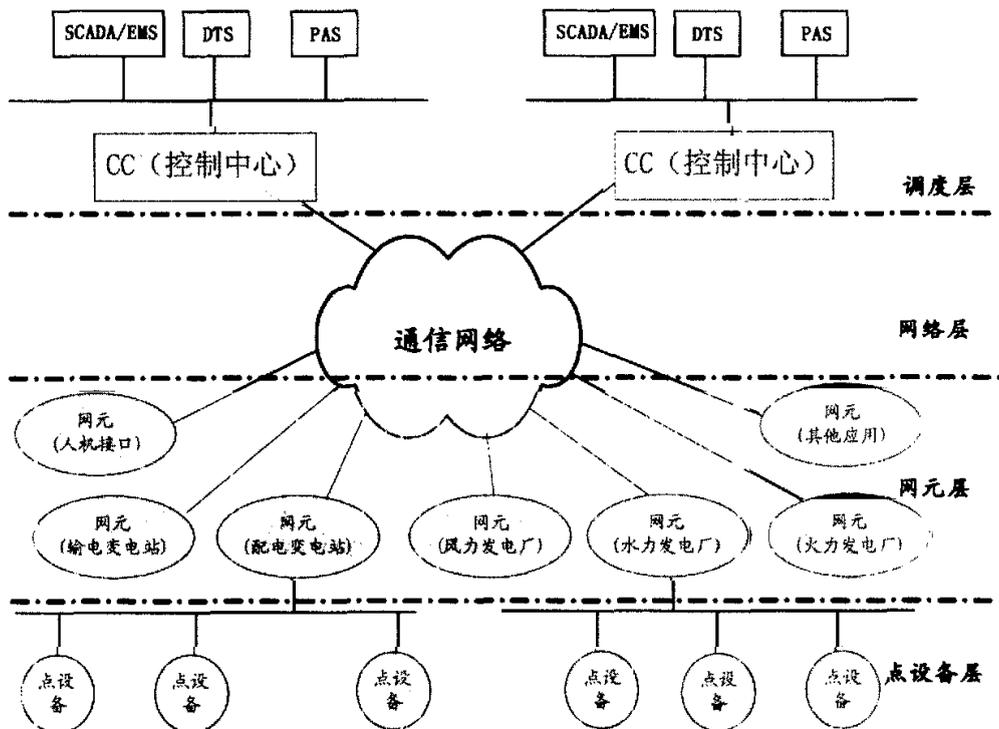


图 2-2 基于网元的电力无缝通信模型

Fig. 2-2 Seamless communication model based units

## 2.3 Petri 网的基本理论

Petri 网是离散事件动态系统建模和分析的主要方法之一，它最早由 C.A.Petri 于 1962 年在其博士论文中提出，从此掀起了对 Petri 网的研究热潮，在国际计算机界、通信界、自动化界等都引起了广大学者的研究兴趣。现在 Petri 网在理论和应用方面都有了较大的发展。

自 Petri 网问世以来，随着研究的不断开展，在理论方面，建立了一些 Petri 网分析方法，Karp 和 Miller 首先引进了可达性树的概念，Peterson 则较系统地研究了矩阵方法，这两种方法已经成为 Petri 网最常用的分析方法。Murata 则利用电路理论中的有关概念和结论来进行一类特殊的 Petri 网的分析和综合。这些，都为 Petri 网的分析方法提供了新的手段。在应用方面，已经远远超出了计算机科学的领域，成为研究离散事件动态系统的有力工具。

Petri 网是一个图形化的建模语言，它能够同时表示由一个系中一个状态到另一个状态变化的过程，Petri 网能够采用面向对象模块化建模，因此它非常适合对大型复杂的系统建模。Petri 网的优点：

1) Petri 网有直观的图形表示，Petri 网实际上就是带有库所和变迁两种类型结点的带有标签的图形，因此它非常的直观。

2) Petri 网能够建立各种分层次的模型；

Petri 网能够为建模或者分析系统性能和功能提供一个框架，并且这种功能可以分布到当前各个子系统中。这种差别就是高阶 Petri 网和低阶 Petri 网之间的不同。低阶 Petri 网有一种简单的图形代表，并且可以为他们找到一个非常适合的理论模型，通过基本的 Petri 网组合高阶 Petri 网络结构。

3) Petri 网能够为同一系统不同行为的时间建模；

在时间 Petri 网，各种令牌 (Token) 允许携带一个时间值，也叫加上时间值的时间标签。直观讲，时间标签描述了最早的令牌使用时的模型时间，比如说刚刚发生转换的事情。当定时器比事件触发的时间小则事件触发优先，即这种时间 Petri 网是由事件来驱动的，因此它与离散时间仿真的时间排队机制类似。系统在给定模型时间之内，一旦发生转移系统则记录。当没有事件发生时，系统运行时钟为下一次状态转移做好准备。

4) Petri 网存在非常成熟而且好使用创建、仿真、分析 Petri 网模型的工具。

因为 Petri 网具有强大的数学背景，所以研究者可以根据其引发规则开发出大量的建模和仿真工具，而且大部分是免费，可以用于商业的。如着色 Petri 网的发明人 K. Jensen 于 1989 年开发出基于 Linux 的 Design Petri Net，它支持编辑、仿真和分析 CP-nets。2001 年 K. Jensen 开发出基于 Linux 和 Windows 的新工具 CPN Tools，目前已经代替了 DesignPetri Net。CPN Tools 拥有一个

新的采用 State-of-the-art 技术的 GUI (图形接口), 定义数据或者修改数据两种工具都是标准的 ML 程序语言, 支持把着色 Petri 网导入和导出为符合 XML 语法的文本文件。目前正在制定的有关 Petri 网的国际标准就是在 CPN Tools 的基础上发展的。关于 Petri 网的计算机工具, 可参见文献[59]。

### 5) Petri 网可以面向对象建模

面向对象方法不仅仅是一种程序设计技术, 而且是一种全新的构造与开发复杂系统的思想和方法; 在构造复杂的大系统时, Petri 网能够简洁地描述系统的动态特性 (如: 并发、冲突、同步等), 并有相应的分析方法 (如: 可达数分析、不变量分析以及图论等相关理论分析); 所以被广泛地应用在具有并发、异步性质的系统建模与分析中。

将面向对象技术和 Petri 网技术相结合, 充分发挥二者的优势, 同时尽量弥补二者的缺点, 为各种复杂的系统建模提供了有效方法。

面向对象技术对解决复杂性问题以及可重用问题提供了有效的方法。而 Petri 网适合于描述系统的动态特性和系统中的资源约束条件, 即有形式化描述, 又可采用图形直观地表示。如 Petri 网对面向对象的行为特征可以如下描述:

- 1) Petri 网的变迁 (transition) 系列可用来描述对象的行为和操作, 对象状态 (属性) 的变化可由库中所令牌的得到和失去表示。
- 2) Petri 网建立的系统模型进行逐层抽象, 具有较好的模块性, 与面向对象技术的封装性相对应。
- 3) 本质上讲, Petri 网的令牌驱动机制和面向对象的消息机制都属于基于事件的驱动方式。

## 2.3.1 背景知识

在介绍 Petri 网的严格定义之前, 我们先介绍要用到的背景知识<sup>[60]</sup>。在本文中,  $\mathbf{N}$  代表自然数,  $\mathbf{Z}$  代表整数。

**定义 2.3.1.1 (多重集).** 设  $S$  为一个非空有限集,  $S$  上的多重集 (multiset over  $S$ ) 是一个函数  $m: S \rightarrow \mathbf{Z}$ 。多重集  $m$  也经常以  $\sum_{s \in S} m(s) \cdot s$  的形式来表示, 符号  $S_{MS}$  表示由所有  $S$  上的多重集所组成的集合。

一个  $S$  上的多重集经常代表一组元素  $s \in S$ , 这里  $s$  出现  $|m(s)|$  次 ( $m(s)$  称为  $s$  的系数 (coefficient)). 对于  $m_1, m_2 \in S_{MS}$  以及  $n \in \mathbf{Z}$ , 我们定义下列规则:  $m_1 + m_2 = \sum_{s \in S} (m_1(s) + m_2(s))s$ ;  $n * m = \sum_{s \in S} (n \cdot m(s))s$ ;  $m_1 = m_2$  当且仅当  $\forall s \in$

$S: [m_1(s)=m_2(s)]; m_1 < m_2$  当且仅当  $\forall s \in S: [m_1(s) < m_2(s)]; m_2 - m_1 = \sum_{s \in S} (m_2(s) - m_1(s))s$ .

**定义 2.3.1.2**(函数的多重集扩展). 给出两个非空集  $S$ 、 $R$  以及一个函数  $F: S \rightarrow R_{MS}$ ,  $F$  的多重集扩展(multi-set extension)是一个函数  $\hat{F}: S_{MS} \rightarrow R_{MS}$  满足:  $\forall m \in S_{MS}, \hat{F}(m) = \sum_{s \in S} m(s) \cdot F(s)$ .

**定义 2.3.1.3**(广义矩阵乘积). 设 1)  $A$  和  $B$  为两个集合; 2)  $F$  是一个  $m \times n$  的矩阵, 其元素  $f_{ij}: AMS \rightarrow BMS$  是一个线性函数; 3)  $V$  是一个  $n$  元矢量, 其第  $j$  个元素  $v_j \in AMS$ , 则广义矩阵乘积(generalized matrix-multiplication)  $F * V$  定义为一个  $m$  元矢量  $W$ , 其第  $i$  个元素

$$w_i = \sum_{j=1}^n f_{ij}(v_j) \in BMS.$$

**定义 2.3.1.4**(lambda 表达式). lambda 表达式(lambda expression)是一个形式为  $\lambda \text{signature} | \text{predicate.expression}$  的函数. 它把组成'signature'的且使'predicate'为真的变量值映射到'expression'中.

本文所使用的符号

- 设  $x$  是一个变量或表达式, 符号  $Type(x)$  表示  $x$  的“类型(type)”.
- 设  $Exp$  是一个表达式, 符号  $Var(Exp)$  代表在  $Exp$  中自由变量的集合.
- 在不引起混淆的情况下, 我们有时把  $\alpha * \beta^T$  记为  $\alpha * \beta$ , 这里  $\alpha$  和  $\beta$  是两个矢量,  $|\alpha| = |\beta|$ .
- $0$  代表零函数.
- 假设  $S_1$  和  $S_2$  是两个集合,  $S_1/S_2$  代表  $S_2$  在  $S_1$  中的补集, 即  $S_1/S_2 = \{a \in S_1 | a \notin S_2\}$ . 若  $S_1 \cap S_2 = \emptyset$ . 我们记  $S_1 \cup S_2$  为  $S_1 + S_2$ .

### 2.3.2 位置/变迁网及其性质

位置/变迁网属低级网(low level Petrinets), 是最为广泛使用的 Petri 网.

**定义 2.3.2.1**(位置/变迁网, P/T-网). 一个位置/变迁网(place/transition nets, 简称 P/T-nets, P/T-网)是一个五元组  $N = \langle P, T, F, C, W \rangle$ , 其中:

- $P$  是一个有限集, 其元素称为位置(place);
- $T$  是一个有限集, 其元素称为变迁(transition);
- $P \cap T = \emptyset$  且  $P \cup T \neq \emptyset$ ;
- $F = P \times T \cup T \times P$ , 其元素称为弧(arc)、流(flow)或流关系(flow relation);
- $C: P \rightarrow \mathbf{N} \cup \{\infty\}$  叫容量函数(capacity function).
- $W: F \rightarrow \mathbf{N}$  称为权重函数(weight function).

一个 P/T-网可用图形表示。一个位置经常画成一个圆圈。一个变迁画成一个方条。若  $(p,t) \in F: W(p,t) \neq 0$ , 则画一条从位置  $p$  到变迁  $t$  的弧线, 并在旁标上  $W(p,t)$  的值; 若  $(t,p) \in F: W(t,p) \neq 0$ , 则画一条从变迁  $t$  到位置  $p$  的弧线, 在旁标上  $W(t,p)$  的值。

在应用中, P/T-网的位置常用来表示状态, 变迁常用来表示行为, 引发规则表示了行为的条件和结果。

本节以下定义都是相对于 P/T-网  $N = \langle P, T, F, C, W \rangle$  的。

**定义 2.3.2.2(标识网)**. 一个标识网(marked net)是一个 P/T-网满足:

- a.  $\forall p \in P, C(p) = \infty$ .
- b.  $\forall f \in F, W(f) = 0$  或  $1$ .

**定义 2.3.2.3(P/T-网的标识、初始标识、令牌)**. 函数  $M: P \rightarrow \mathbf{N} \cup \{\infty\}$  称为 P/T-网  $N$  的标识(marking)当且仅当  $\forall p \in P: M(p) \leq C(p)$ .  $M$  的初始值称为初始标识(initiate marking), 常记为  $M_0$ . 标识用来表示令牌(token)的数目。

在图形中, 每个令牌通常用一个圆点表示。

标识代表了系统现时的状态, 令牌分布和流动使系统的并行特性易于模拟。

**定义 2.3.2.4(可引发, 引发 P/T-网)**. P/T-网  $N$  的一个变迁  $t \in T$  称为在  $M$  中可引发(firable, 也称可使能, enabled)当且仅当:

- a.  $\forall p \in P, M(p) \geq W(p,t)$ ;
- b.  $\forall p' \in P, M(p') + W(t,p') \leq C(p')$ .

在  $M$  可引发的  $t$  可以引发(fire)并把标识从  $M$  改为  $M'$ , 这里  $M'$  满足  $\forall p \in P, M'(p) = M(p) - W(p,t) + W(t,p)$ .  $t$  的引发记为  $M[t > M']$ .

以上定义称为 P/N-网  $N$  的引发规则。

**定义 2.3.2.5(P/T-网的可达集)**. P/T-网  $N$  的可达集(reach ability set), 记为  $[M_0 >$ , 是满足下列条件的最小集:

- a.  $M_0 \in [M_0 >$ .
- b. 若  $\exists M_1 \in [M_0 >$ , 则对于  $\forall t \in T, M_1[t > M_2: M_2 \in [M_0 >$ .

**定义 2.3.2.6(P/T-网的引发序列)**. 序列  $\sigma = t_1 \rightarrow t_2 \rightarrow \dots \rightarrow t_i \rightarrow \dots \rightarrow t_n (n \in \mathbf{N})$  称为 P/T-网  $N$  在标识  $M_0$  的引发序列(firing sequence)当且仅当存在一个标识序列  $M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow \dots \rightarrow M_i \rightarrow \dots \rightarrow M_n$  满足:  $\forall i: M_{i-1}[t_i > M_i (1 \leq i \leq n)$ .  $\sigma$  的引发记为  $M_0[\sigma > M_n$ .

### 2.3.3 着色 Petri 网的数学及图形表述

与一般的计算机语言从汇编发展到高级类似, Petri 网也从低级发展到高级. 目前常用的高级 Petri 网有两种: 谓词/变迁网(predicate/transition Petrinets, 简称 Pr/T-网)和着色 Petri 网(colored Petrinets, 简称 CP-网)。

一个 CP-网有两种不同的表述方式: 一个是 CP-矩阵(CP-matrix); 另一个是 CP-图(CP-graph). 前者是 CP-网的数学表述, 适合于 CP-网的定量分析; 后者是 CP-网的图形表述, 适合于 CP-网的定性分析. 这两种方式是等价的, 并且它们之间有严格的转换规则.

**定义 2.3.3.1**(CP-矩阵, 即通常意义下的 CP-网). 一个 CP-矩阵(CP-matrix, 也称 CP-网, CP-net)是一个五元组  $N = \langle P, T, C, I, I_+ \rangle$ , 其中:

a.  $P$  是一个有限集, 其元素称为位置(place);

b.  $T$  是一个有限集, 其元素称为变迁(transition);

c.  $P \cap T = \emptyset$  且  $P \cup T \neq \emptyset$ ;

d.  $C$  称为定义在  $P \cup T$  上的颜色函数(colour function),  $\forall p \in P, C(p)$  称为令牌色集(token-colors set);  $\forall t \in T, C(t)$  称为事件色集(occurrence-colors set);

e.  $I/I_+$  称为  $P \times T$  上的负 / 正关联函数(negative/positive incidence-function),  $\forall p \in P, \forall t \in T$ , 函数值  $I(p, t)/I_+(p, t)$  本身也是一个函数  $C(t)_{MS} \rightarrow C(p)_{MS}$ ;

$I/I_+$  也常被看作是一个  $|P| \times |T|$  矩阵, 其第  $i$  行和第  $j$  列的元素取  $I(p_i, t_j)/I_+(p_i, t_j)$ , 这时,  $I/I_+$  称为前矩阵/后矩阵(pre-matrix/post-matrix);  $I = I_- - I_+$  称为关联矩阵(incidence matrix);

f.  $\forall p \in P, \exists t \in T$ , 或者  $I(p, t) \neq 0$  或者  $I_+(p, t) \neq 0$ ;

$\forall t \in T, \exists p \in P$ , 或者  $I(p, t) \neq 0$ , 或者  $I_+(p, t) \neq 0$ .

**定义 2.3.3.2**(CP-网的步骤、单一步骤). CP-网的一个步骤(step)是它的矩阵  $N$  中  $T$  上的函数  $X$  满足  $\forall t \in T, S(t) \in C(t)_{MS}$ . CP-网  $N$  的单一步骤(simplestep)是一个步骤  $X$  满足:  $\exists t_1 \in T, S(t_1) \neq 0$ ; 对于  $t \neq t_1, S(t) = 0$ . 单一步骤  $S$  经常记为  $(t_1, S(t_1))$ .

以上是 CP-网的数学表述, CP-网还可以用图形表述.

**定义 2.3.3.3**(CP-图)一个 CP-图(CP-graph)是一个七元组  $G = \langle P, T, A, C, V, E, Gu \rangle$ , 其中:

a.  $P$  和  $T$  是两个不交的点集,  $P$  和  $T$  的元素分别叫位置(place)和变迁(transition). 一个位置经常画成一个圆圈, 一个变迁画成一个方框.

b.  $A$  是连接一个位置和一个变迁的有向弧线(arcs)集.一条从一个位置  $p$  到一个变迁  $t$  的弧线记为  $(p,t)$ ,而一条从一个变迁  $t$  到一个位置  $p$  的弧线记为  $(t,p)$ .

c.  $C$  是一个定义在上的颜色函数(colour function). $\forall p \in P, C(p)$  是一个令牌色(token-colors)集.

d.  $V$  是一个分类(typed)变量集,每个分类变量  $v:D$  有变量名  $v$  和类型  $D$ .

e.  $E:A \rightarrow \text{Exp}$  是一个弧线表达式函数(arcexpressionfunction). $\text{Exp}$  是一个含有一组自由变量  $\{v_1:D_1, v_2:D_2, \dots, v_n:D_n\} \subseteq V$  的表达式. $\forall a \in A, \text{Type}(E(a))$  是  $C(p(a))_{MS}$ ,其中  $p(a)$  是弧线的起始/中止位置.

f.  $\text{Gu}:T \rightarrow \text{Pr}$  称为门卫函数(guard function). $\text{Pr}$  是一组一阶逻辑公式(first order formula). $\text{Gu}(t)$  仅包含与  $t$  相连的弧线表达式内的变量.

g. 在图中无孤立的位置和变迁.

**定义 2.3.3.4**(CP-网的标识、初始标识).CP-网  $N$ (或  $G$ )的一个标识(标识) $M$  是  $P$  上的一个函数满足  $\forall p \in P, M(p) \in C(p)_{MS}$ . $M$  的初始值称为初始标识(initiate marking),常记为  $M_0$ .

**规则 2.3.3.1**(把 CP-图转换为 CP-矩阵).以下是把 CP-图  $G=\langle P, T, A, C, V, E, \text{Gu} \rangle$  转换为 CP-矩阵  $N=\langle P', T', C', I', I_+ \rangle$  的规则:

a.  $P' \equiv P, T' \equiv T$ .

b.  $\forall p \in P': C'(p) \equiv C(p)$ .

$\forall t \in T': C'(t) \equiv \{(d_1, d_2, \dots, d_n) \in D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n \mid \lambda(v_1:D_1, v_2:D_2, \dots, v_n:D_n). \text{Gu}(t)(d_1, d_2, \dots, d_n)\}$ .  $v_1, v_2, \dots, v_n$  是在与  $t$  相连的所有弧线表达式内的分类变量.

c.  $\forall (p, t) \in P \times T$ : 若  $(p, t) \in A$ , 则  $I'(p, t)$  定义为  $\lambda(v_1, v_2, \dots, v_n). E(p, t)$  的多重集扩展; 否则  $I'(pt) \equiv \mathbf{0}$ .

d.  $\forall (t, p) \in T \times P$ : 若  $(t, p) \in A$ , 则  $I_+(p, t)$  定义为  $\lambda(v_1, v_2, \dots, v_n). E(t, p)$  的多重集扩展; 否则  $I_+(pt) \equiv \mathbf{0}$ .

**规则 2.3.3.2**(把 CP-矩阵转换为 CP-图).以下是把 CP-矩阵  $N=\langle P, T, C, I, I_+ \rangle$  转换为 CP-图  $G=\langle P', T', A', C', V', E', \text{Gu}' \rangle$  的规则:

a.  $P' \equiv P, T' \equiv T$ .

b.  $A' \equiv \{(p, t) \mid I(p, t) \neq \mathbf{0}\} \cup \{(t, p) \mid I_+(p, t) \neq \mathbf{0}\}$ .

c.  $\forall p \in P': C'(p) \equiv C(p)$ .

$$d. V \equiv \{x: \bigcup_{t \in T} C(t)\}.$$

$$e. \forall p \in P, \forall t \in T: \text{若 } (p,t) \in A', \text{ 则 } E'(p,t) \equiv I_-(p,t); \text{ 若 } (t,p) \in A', \text{ 则 } E'(t,p) \equiv I_+(p,t).$$

$$f. \forall t \in T, Gu'(t) \equiv (x \in C(t)).$$

以下各节的定义都是关于 CP-网  $N = \langle P, T, C, I_-, I_+ \rangle$  或  $G = \langle P, T, A, C, V, E, Gu \rangle$  的,

### 2.3.4 着色 Petri 网的动态特性

**定义 2.3.4.1**(可引发, CP-网的引发).CP-网的步骤  $S$  称为在标识  $M$  可引发(firable, 也称使能的 enabled)当且仅当  $I_- * S \leq M$ , i.e.,  $\forall p \in P, \sum_{t \in T} I_-(p,t)(X(t)) \leq M(p)$ .

一个在  $M$  可引发的步骤  $S$  可以引发(fire)并把标识从  $M$  改为  $M'$ , 其中  $M' = (M - I_- * S) + I_+ * S$ .  $S$  的引发记为  $M[S > M']$ . 当  $S$  是一个简单步骤且  $S(t_1) \neq 0$  时, 在不至于引起混淆的情况下, 我们也可把“引发  $S$ ”简单地称为“firing  $t_1$ ”.

以上定义称为 CP-网的引发规则(firing rule).

**定义 2.3.4.2**(CP-网的引发序列).CP-网的一个步骤序列  $\sigma = S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow \dots S_i \rightarrow \dots S_n (n \in \mathbf{N})$  称为在标识  $M_0$  的引发序列(firing sequence)当且仅当存在一个标识序列  $M_1 \rightarrow M_2 \rightarrow \dots M_i \rightarrow \dots M_n$  满足:  $\forall i: M_{i-1}[S_i > M_i] (1 \leq i \leq n)$ .  $\sigma$  的引发记为  $M_0[\sigma > M_n]$ .

### 2.3.5 着色 Petri 网的不变量分析

**定义 2.4.5.1**(CP-网的位置权重函数、变迁权重函数、支撑).CP-网的位置权重函数(place weight-function)  $W_P$  是  $P$  上的一个函数满足:  $\forall p \in P, W_P(p)$  本身也是一个函数从  $C(p)_{MS}$  映射到  $S_{MS}$ , 其中  $S$  是一个非空集.  $W_P$  的支撑(support)是一个位置的集合  $\{p \in P | W_P(p) \neq 0\}$ . CP-网的变迁权重函数(transition weight-function)  $W_T$  是  $T$  上的一个函数满足  $\forall t \in T, W_T(t) \in C(t)_{MS}$ .  $W_T$  的支撑(support)是一个变迁的集合  $\{t \in T | W_T(t) \neq 0\}$ . 令  $W$  为 CP-网的位置权重函数或变迁权重函数,  $W$  常被看作是一个  $|T|$  元矢量,  $W(t_i)$  作为其第  $i$  个元素.

**定义 2.3.5.2**(CP-网的位置不变量、P-不变量、变迁不变量、T-不变量).设  $I$  是一 CP-网  $N$  的关联矩阵.  $N$  的位置权重函数  $W_P$  称为位置不变量(place-invariant, 简称 P-不变量)当且仅当  $W_P * I = 0$ .  $N$  的变迁权重函数  $W_T$  称为变迁不变量(transition-invariant, 简称 T-不变量)当且仅当  $I * W_T = 0$ .

定义 2.3.5.3(可实现, CP-网的实现序列).CP-网的 T-不变量  $W_T$  称为可实现的 (realizable) 当且仅当存在一个引发序列  $\sigma=S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow \dots \rightarrow S_i \rightarrow \dots \rightarrow S_n$  满足  $\sum_{i=1}^n S_i = W_T$ .  $\sigma$  称为  $W_T$  的实现序列(realizing sequence).

定理 2.3.5.1.  $W_P$  是一个 CP-网的 P-不变量.若存在一个引发序列  $\sigma$  满足  $M[\sigma > M'$ , 则  $W_P * M = W_P * M'$ .

证明: [65]

定理 2.3.5.1 说明了若存在一个 P-不变量, 标识的线性加权和不变。这里“加权(weighted)”的意思是通过权重函数把  $M(p)$  映射到同一多重集。

定理 2.3.5.2. 若  $\sigma$  是 CP-网的 T-不变量  $W_T$  的实现序列,  $M[\sigma > M'$ , 则  $M' = M$ .

证明: 设  $\sigma=S_1 \rightarrow S_2 \rightarrow \dots \rightarrow S_i \rightarrow \dots \rightarrow S_n$ ,  $M_1=M$ ,  $M_{n+1}=M'$ , 对于  $1 \leq i \leq n$ ,  $M_i[S_i > M_{i+1}$ , 由引发规则:

$$M_{i+1} = (M_i - I * S_i) + I * S_i = M_i + I * S_i, 1 \leq i \leq n.$$

$$M' = M_{n+1} = M_1 + I * \left( \sum_{i=1}^n S_i \right) = M + I * \left( \sum_{i=1}^n S_i \right).$$

从定义 2.3.5.3,  $M' = M + I * W_T$ .

从定义 2.3.5.2,  $M' = M$ .

这个定理说明了引发一个实现序列后, CP-网的标识保持不变。

定义 2.3.5.4(CP-网的加权网流). 给出 CP-网  $N$ ,  $W_P$  和  $W_T$  分别是位置加权函数和变迁加权函数.  $p \in P, T' \subseteq T, t \in T, P' \subseteq P, p$  的  $W_T$ -加权网流( $W_T$ -weighted net flow)  $T'$  定义为  $NF(p, T', W_T) = \sum_{t \in T'} I(p, t) * W_T(t)$ .  $t$  的  $W_P$ -加权网流( $W_P$ -weighted net flow)  $P'$

定义为  $NF(t, P', W_P) = \sum_{p \in P'} W_P(p) * I(p, t)$

### 2.3.6 着色 Petri 网不变量守恒变换概述

Petri 网的变换是 Petri 网分析重要的数学工具, 出于模拟和分析系统的需要, 它把 Petri 网变换成另一种易于进行观察和处理的形式, 同时又要保留原 Petri 网的某些特性, 这就是所谓特性保留(properties-preserving)。文献<sup>[60,90]</sup>提出了关于 CPN 网的五类变换: 嵌入(elimination), 消去(elimination), 替换(replacement), 组

合(composition)和分解(decomposition), 并且建立了一些定理提出特性守恒和条件. 本文使用其嵌入变换和组合变换.

定义 2.3.6.1(CP-图的嵌入变换变换, 简称 T-IN). 给出一个 CP-图  $G=\langle P,T,A,C,V,E,Gu\rangle, P=UP+AP, T=UT+AT$ . 嵌入变换变换 (transformation of insertion) T-IN 通过下列规则把  $G$  变换成另一 CP-网  $G'=\langle P',T',A',C',V',E',Gu'\rangle$ :

a.  $P'\equiv P+IP$ ,  $IP$  是要嵌入变换的位置的集合.

b.  $T'\equiv T+IT$ ,  $IT$  是要嵌入变换的变迁的集合.

c.  $A'\equiv(A-AA)+IA$ , 其中

$AA\equiv(\{(p,t)|p\in AP \text{ 且 } t\in AT\}+\{(t,p)|p\in AP \text{ 且 } t\in AT\})\cap A$ ,

$IA\subseteq\{(p,t)|(p\in IP \text{ 且 } t\in IT)\text{ 或 } (p\in AP \text{ 或 } t\in AT)\}+\{(t,p)|(p\in IP \text{ 且 } t\in IT)\text{ 或 } (p\in AP \text{ 且 } t\in AT)\}$ .

d.  $C'(p)\equiv IC(p)$  若  $p\in IP$

$\equiv C(p)$  若  $p\in P$ .

e.  $E'(a)\equiv IE(a)$  若  $a\in IA$

$\equiv E(a)$  若  $a\in A-AA$ .

这里  $IE:IA\rightarrow Exp$  是一个弧线表达式函数.

f.  $V'\equiv UV\cup IV$ , 这里  $UV=\bigcup_{a\in A-AA} Var(E(a))$ , 且  $IV=\bigcup_{a\in IA} Var(IE(a))$ .

g.  $Gu'(t)\equiv Gu(t)$  若  $t\in UT\cup AT$

$\equiv IGu(t)$  若  $t\in IT$ .

这里  $IGu:IT+AT\rightarrow Pr$  是一个门卫函数.

定义 2.3.6.1 从 CP-网的图形结构来定义 T-IN.  $UP/UT$  代表在  $G$  中不与任何嵌入变换的变迁/位置相连的位置/变迁的集合. 变换对它们没有影响.  $AP/AT$  代表与嵌入变换的变迁/位置相连的位置/变迁的集合. 变换对它们产生影响.  $AA$  代表  $AP$  的位置与  $AT$  的变迁之间的弧线集.  $IA$  是一个弧线集, 其中的元素用来替换变换  $AA$  的弧线或加入  $N$  中.  $UV$  代表在  $A-AA$  的表达式内的自由变量的集合.  $IV$  代表在  $IA$  的表达式内的自由变量的集合.

定理 2.3.6.1. 假设 CP-图  $G$  通过嵌入变换变换 T-IN(见定义 2.3.6.1)变换为  $G'$ ,  $G$  的 CP-矩阵  $N=\langle P,T,C,I,I_+\rangle$  由下列规则相应地变换为  $N'=\langle P',T',C',I',I'_+\rangle$ :

a.  $P'=P+IP$ .

b.  $T'=T+IT$ .

c. 若  $x\in P+UT$ , 则  $C'(x)=C(x)$ .

若  $x\in IP$ , 则  $C'(x)=IC(x)$ .

若  $x\in AT$ , 则  $C'(x)=\{(r_1, r_2, \dots, r_m, d_1, d_2, \dots, d_n) \mid \lambda (v_1: D_1, v_2: D_2, \dots,$

$v_m:D_m, v_{m+1}:D_{m+1}, v_{m+2}:D_{m+2}, \dots, v_{m+n}:D_{m+n}$ .  $Gu(x) (r_1, r_2, \dots, r_m, d_1, d_2, \dots, d_n)$ .

$$\{v_1, v_2, \dots, v_m\} = \bigcup_{a \in A'_1} Var(E(a)) \text{ 且}$$

$$\{v_{m+1}, v_{m+2}, \dots, v_{m+n}\} = \bigcup_{a \in A'_2} Var(E(a)) \setminus \bigcup_{a \in A'_1} Var(E(a)), \text{ 其中}$$

$$A'_1 = \{(x, p) | (x, p) \in A-AA\} \cup \{(p, x) | (p, x) \in A-AA\},$$

$$A'_2 = \{(x, p) | (x, p) \in IA\} \cup \{(p, x) | (p, x) \in IA\}.$$

若  $x \in IT$ , 则

$$C'(x) = \{(d_1, d_2, \dots, d_k) | \lambda(v_1:D_1, v_2:D_2, \dots, v_k:D_k).IGu(x)(d_1, d_2, \dots, d_k)\}.$$

$$\{v_1, v_2, \dots, v_k\} = \bigcup_{a \in A'_3} Var(E(a)), \text{ 其中}$$

$$A'_3 = \{(x, p) | (x, p) \in IA\} + \{(p, x) | (p, x) \in IA\}.$$

d. 若  $t \in UT, p \in P$ , 则  $I^-(p, t) = I_-(p, t), I^+(p, t) = I_+(p, t)$ .

若  $t \in UT, p \in IP$ , 则  $I^-(p, t) = \mathbf{0}, I^+(p, t) = \mathbf{0}$ .

若  $t \in AT$  且  $p \in UP$ , 设  $I_-(p, t) = \hat{i}_-(p, t), I_+(p, t) = \hat{i}_+(p, t)$ , 则  $I^-(p, t)$  定义为  $\lambda(Z(t)).i_-(p, t)$  的多重集扩展,  $I^+(p, t)$  定义为  $\lambda(Z(t)).i_+(p, t)$  的多重集扩展, 这里  $Z(t)$  是取决于  $t$  的变量,  $Type(Z(t)) = (C'(t))_{MS}$ .

若  $t \in IT$  且  $p \in UP$ ,  $I^-(p, t) = \mathbf{0}, I^+(p, t) = \mathbf{0}$ .

若  $t \in AT+IT, p \in AP+IP$  且  $(p, t) \in A'$ , 则  $I^-(p, t)$  定义为  $\lambda(Z(t)).IE(p, t)$  的多重集扩展, 这里  $Z(t)$  是取决于  $t$  的变量,  $Type(Z(t)) = (C'(t))_{MS}$ .

若  $t \in AT+IT, p \in AP+IP$  且  $(t, p) \in A'$ , 则  $I^+(p, t)$  定义为  $\lambda(Z(t)).IE(p, t)$  的多重集扩展, 这里  $Z(t)$  是取决于  $t$  的变量,  $Type(Z(t)) = (C'(t))_{MS}$ .

若  $(p, t) \notin A'$  则  $I^-(p, t) = \mathbf{0}$ .

若  $(t, p) \notin A'$  则  $I^+(p, t) = \mathbf{0}$ .

证明: 由定义 2.3.6.1 和规则 2.3.3.1, 不难给出证明.

下面的定理告诉我们在什么条件下 T-IN 能保留 P-不变量的支撑定理.

**定理 2.3.6.2.** 假设  $N$  通过定义 2.4.6.1 的嵌入变换 T-IN 变换为  $N'$ .  $W_P$  是  $N$  的位置权重函数,  $U+A$  是它的支撑, 其中  $U \subseteq UP, A \subseteq AP$ .  $W'_P$  是  $N'$  的位置权重函数,  $U+A+I$  是它的支撑, 其中  $I \subseteq IP$ .  $\forall p \in U+A, W_P(p) = W'_P(p)$ . 若满足下面的条件:

a.  $\forall t \in AT, NF(t, A+I, W'_P) = NF(t, A, W_P)$

b.  $\forall t \in IT, NF(t, A+I, W'_P) = \mathbf{0}$

则,  $W_P$  是  $N$  的 P-不变量  $W_P$  当且仅当  $W'_P$  是  $N'$  的 P-不变量.

合成变换(T-CO)通过一对一地合并它们的位置或变迁连接两个 CP-网, 而分解

变换(T-DC)则是它的逆过程.这些变换通常用于系统的模块分析中.

合成变换和嵌入变换都用来把两个 CP-网合并为一个,但它们是两类不同的变换.不同之处在于:合成变换保留了两部分的性质,而嵌入变换仅保留了主体的性质,对于插入部分的性质是忽略的.分解变换与消除变换也有同样的关系.

T-CO 包括两类并列的变换:合并位置合成变换(composition-by-fusing-places,简称 T-CP)和合并变迁合成变换(decomposition-by-fusing-transition,简称 T-CT).

**定义 2.3.6.2**(合并位置合成变换, T-CP).  $G_1 = \langle P_1, T_1, A_1, C_1, V_1, E_1, Gu_1 \rangle$  和  $G_2 = \langle P_2, T_2, A_2, C_2, V_2, E_2, Gu_2 \rangle$  是两个 CP-图.  $P_1 = UP_1 + AP_1$ , 其中  $AP_1 = \{p_{1,1}, p_{1,2}, \dots, p_{1,i}, \dots, p_{1,m}\}$ .  $P_2 = UP_2 + AP_2$ , 其中  $AP_2 = \{p_{2,1}, p_{2,2}, \dots, p_{2,i}, \dots, p_{2,m}\}$ . 对于  $1 \leq i \leq m, C_1(p_{1,i}) = C_2(p_{2,i})$ . 合并位置合成变换 T-CP 由如下规则把  $G_1$  和  $G_2$  变换为 CP-网  $G' = \langle P', T', A', C', V', E', Gu' \rangle$ :

$$a. P' \equiv UP_1 + AP + UP_2, \text{ 其中 } AP = \{p'_1, p'_2, \dots, p'_i, \dots, p'_m\}.$$

$$b. T' \equiv T_1 + T_2.$$

$$c. A' \equiv A'A + A'b + A'c + A'd + A'e + A'f + A'g + A'h, \text{ 其中,}$$

$$A'_a \equiv \{(p', t') | p' \in UP_1, t' \in T_1, (p', t') \in A_1\},$$

$$A'_b \equiv \{(t', p') | p' \in UP_1, t' \in T_1, (t', p') \in A_1\},$$

$$A'_c \equiv \{(p', t') | p' \in UP_2, t' \in T_2, (p', t') \in A_2\},$$

$$A'_d \equiv \{(t', p') | p' \in UP_2, t' \in T_2, (t', p') \in A_2\},$$

$$A'_e \equiv \sum_{i=1}^m \sum_{t \in T_1} \{(p'_i, t) | (p_{1,i}, t) \in A_1\},$$

$$A'_f \equiv \sum_{i=1}^m \sum_{t \in T_1} \{(t, p'_i) | (t, p_{1,i}) \in A_1\},$$

$$A'_g \equiv \sum_{i=1}^m \sum_{t \in T_2} \{(p'_i, t) | (p_{2,i}, t) \in A_2\},$$

$$A'_h \equiv \sum_{i=1}^m \sum_{t \in T_2} \{(t, p'_i) | (t, p'_{2,i}) \in A_2\}.$$

$$d. C'(p) \equiv C_1(p) \text{ 若 } p \in UP_1$$

$$\equiv C_2(p) \text{ 若 } p \in UP_2$$

$$\equiv C_1(p_{1,i}) \text{ 若 } p = p'_i, \text{ for } 1 \leq i \leq m.$$

$$e. E'(a) \equiv E_1(a) \text{ 若 } a \in A_1.$$

$$\equiv E_2(a) \text{ 若 } a \in A_2.$$

$$\equiv E_1(p_{1,i}, t_1) \text{ 若 } a = (p'_1, t_1), i = 1, 2, \dots, m, t_1 \in T_1.$$

$$\equiv E_1(t_1, p_{1,i}) \text{ 若 } a = (t_1, p'_1), i = 1, 2, \dots, m, t_1 \in T_1.$$

$$\equiv E_2(p_{2,i}, t_2) \text{ 若 } a = (p'_2, t_2), i = 1, 2, \dots, m, t_2 \in T_2.$$

$$\equiv E_2(t_2, p_{2,i}) \text{ 若 } a=(t_2, p'_2), i=1, 2, \dots, m, t_2 \in T_2.$$

$$f. V' \equiv V_1 \cup V_2.$$

$$g. Gu'(t) \equiv Gu_1(t) \text{ 若 } t \in T_1$$

$$\equiv Gu_2(t) \text{ 若 } t \in T_2.$$

在定义 2.3.6.2 中, T-CP 通过把  $p_{1,i}$  和  $p_{2,i}$  合并为  $p'_i (i=1, 2, \dots, m)$  而不改变其他元素把  $G_1$  和  $G_2$  变换为  $G'_i$ .

**定理 2.3.6.3** 假设两个 CP-图  $G_1$  和  $G_2$  通过定义 2.3.6.2 的合成变换 T-CP 变换为  $G'$ , 则  $G_1$  的 CP-矩阵  $N_1 = \langle P_1, T_1, C_1, I_1^-, I_1^+ \rangle$  和  $G_2$  的  $N_2 = \langle P_2, T_2, C_2, I_2^-, I_2^+ \rangle$  通过下列规则变换为  $N' = \langle P', T', C', I'^-, I'^+ \rangle$ :

$$a. P' = UP_1 + AP + UP_2.$$

$$b. T' = T_1 + T_2.$$

$$c. C'(x) = C_1(x) \text{ 若 } x \in UP_1 + T_1$$

$$= C_2(x) \text{ 若 } x \in UP_2 + T_2$$

$$= C_1(p_{1,i}) \text{ 若对于 } 1 \leq i \leq m, p = p'_i$$

$$d. \text{若 } t \in T_1 \text{ 且 } p \in UP_1, \text{ 则 } I'^-(p, t) = I_1^-(p, t), I'^+(p, t) = I_1^+(p, t).$$

$$\text{若 } t \in T_1 \text{ 且 } p = p'_i (1 \leq i \leq m), \text{ 则 } I'^-(p, t) = I_1^-(p_{1,i}, t), I'^+(p, t) = I_1^+(p_{1,i}, t).$$

$$\text{若 } t \in T_1 \text{ 且 } p \in UP_2, \text{ 则 } I'^-(p, t) = \mathbf{0}, I'^+(p, t) = \mathbf{0}.$$

$$\text{若 } t \in T_2 \text{ 且 } p \in UP_2, \text{ 则 } I'^-(p, t) = I_2^-(p, t), I'^+(p, t) = I_2^+(p, t).$$

$$\text{若 } t \in T_2 \text{ 且 } p = p'_i (1 \leq i \leq m), \text{ 则 } I'^-(p, t) = I_2^-(p_{2,i}, t), I'^+(p, t) = I_2^+(p_{2,i}, t).$$

$$\text{若 } t \in T_2 \text{ 且 } p \in UP_1, \text{ 则 } I'^-(p, t) = \mathbf{0}, I'^+(p, t) = \mathbf{0}.$$

**定理 2.3.6.4.** 假设  $N_1$  和  $N_2$  通过定义 2.3.6.2 的合成变换 T-CP 变换为  $N'$ .

a. 令  $1 \leq k \leq m$ . 假设:

1.  $W_{1P}$  是  $N_1$  的位置权重函数, 其支撑为  $U_1 + A_1$ , 这里  $U_1 \subseteq UP_1$ ,

$A_1 = \{p_{1,1}, p_{1,2}, \dots, p_{1,i}, \dots, p_{1,k}\}$ ;

2.  $W_{2P}$  是  $N_2$  的位置权重函数, 其支撑为  $U_2 + A_2$ , 这里

$U_2 \subseteq UP_2, A_2 = \{p_{2,1}, p_{2,2}, \dots, p_{2,i}, \dots, p_{2,k}\}$ ;

3.  $W'_P$  是  $N'$  的位置权重函数, 其支撑为  $U_1 + A + U_2$ , 这里

$A = \{p'_1, p'_2, \dots, p'_i, \dots, p'_k\}$ .

若:

$$1. \quad \forall p \in U_1: W'_P(p) = W_{1P}(p);$$

$$2. \quad \forall p \in U_2: W'_P(p) = W_{2P}(p);$$

$$3. \quad \text{对于 } 1 \leq i \leq k, W_{1P}(p_{1,i}) = W_{2P}(p_{2,i}) = W'_P(p'_i),$$

则:

$W_{1P}$  是  $N_1$  的 P-不变量且  $W_{2P}$  是  $N_2$  的 P-不变量当且仅当  $W_P$  是  $N'$  的 P-不变量.

## 2.4 Petri 网在电力无缝通信中的应用

### 2.4.1 Petri 网在电信业务建模中的应用

如前所述, Petri 网是离散事件动态系统建模和分析的主要方法之一, 是一个图形化的建模语言, 可以面向对象建模, 具有非常成熟的开发工具, 非常适应大型复杂的系统建模。Petri 网曾广泛应用于计算机和通信协议的描述和一致性校验、分布式系统和电信网络的建模、分析和仿真上<sup>[59-94]</sup>。它能够很好地描述协议细节, 反映通信系统的动态行为。作为一种高级 Petri 网, 着色 Petri 网特别适合于那些通讯、同步、资源共享非常重要的系统。例如应用程序间的通讯协议、分布式系统、嵌入式系统、自动化生产系统、工作流分析和超大规模集成电路芯片。着色 Petri 网已被广泛用在电信业务的分析和应用上, 如 Jensen 用着色 Petri 网模拟和分析“普通老式电话服务”(PoTS)<sup>[74]</sup>, 陆以勤等把变换作为业务特性集成的模型, 并作为分析业务冲突的工具, 取得了良好的效果<sup>[65,71,72,76,77,88-90]</sup>。

### 2.4.2 Petri 网电力无缝通信建模中的应用

IEC 借用 UCA 的对象模型来为电力无缝通信系统建模, 它采用 XML 的自我描述语言的方式提供扩展性。但是他们由于是采用不同系统的对象模型, 对定义的模型缺乏一种数学语言来描述, 且没有定义各个子系统之间的关联和关系, 使得他们在电力通信依然是“有缝”的。

借鉴 Petri 网在描述电信业务的成功经验, 根据电力系统的复杂特性, 我们提出采用 Petri 网对电力无缝通信进行描述和分析。主要原因分析如下:

- 1、 Petri 本身是一种建模工具和方法, 是一个图形化的建模语言, 有直观的图形表示, 具有非常成熟的开发工具, 非常适应大型复杂的电力系统的建模。利用 Petri 网, 我们可以用统一的数学语言来描述电力系统。
- 2、 Petri 网可以面向对象建模。面向对象方法不仅仅是一种程序设计技术, 而且是一种全新的构造与开发复杂系统的思想和方法。
- 3、 Petri 网工具最重要的特性之一就是具有向另一种 Petri 网工具导出 Petri 网或者从其他的工具中导入 Petri 网的功能, Petri 网对 XML 有良好的支持, 可以采用 XML 语言实现与现有系统的交互。同时也能兼容其他的 Petri 网, 能够把各个子系统架起希望的桥梁从而实现“统一的大陆”, 达到无缝通信的目标。

图 2-3 给出了基于 Petri 网的电力通信无缝一致模型。

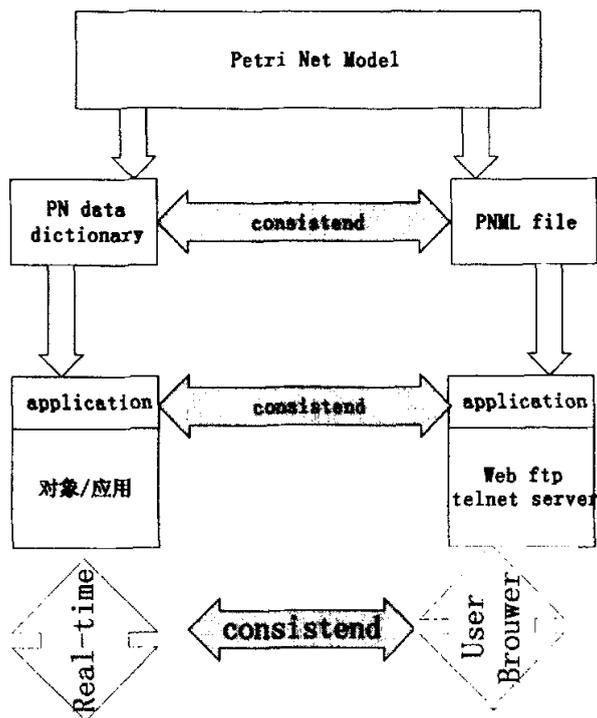


图 2-3 基于 Petri 网的电力通信无缝一致模型

Fig. 2-3 The consistend model of seamless communication based Petri Net in Power system

图 2-3 中 PNML (Petri 网标记语言) 是一种基于 XML 的 Petri 网的交换格式。PNML 可以用 PNTD (Petri 类型定义符) 来定义 Petri 网的类型, PNML 主要用来在解决由于不同的 Petri 网类型而导致的问题。一个满足了交换格式要求的文件就是一个 Petri 网文件(Petri net File)。它可能包含了几个 Petri 网。每个 Petri 网由若干对象构成。对象可以是库所、变迁或为弧。为了构建 Petri 网还要包括另外三种类型的对象:“页”、“引用库所”和“引用变迁”。为方便起见通常把库所、变迁、弧称为结点,把引用库所、引用变迁都称为引用结点。

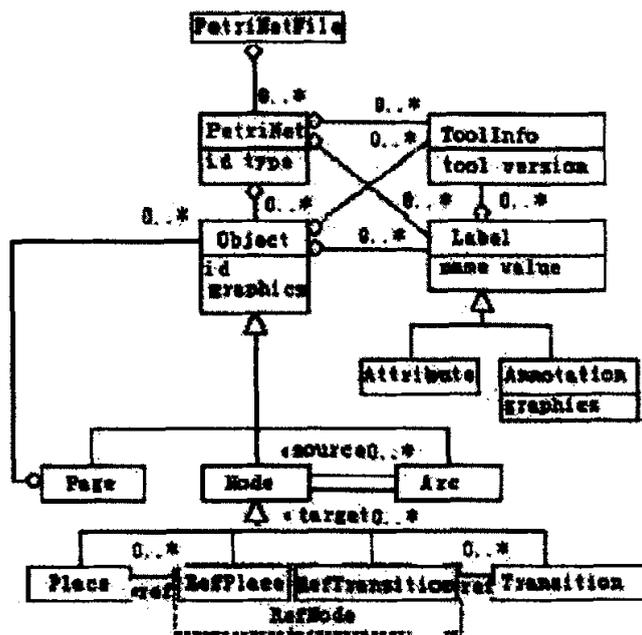


图 2-4 PNML描述语言之间的关系

Fig. 2-4 The relative of Petri net markup language

图 2-4 给出 PNML 描述语言之间的关系，共定义标签(Label)、图像信息(Graphical information)、工具特定信息(Tool specific information)、页(Page)和引用结点(Reference node)、模块(Module)、符号(Symbol)、标识符(Identifiers)、导入和导出(Import and Export)、全局结点、符号、引用(Global Nodes, Symbols, and References)、模块实例(Module instances)来满足 PNML 对各种 Petri 网的需求，详细介绍见文献<sup>[63]</sup>。

## 2.5 本章小节

本章根据电力通信系统的特点，提出了基于网元、网络模型的无缝通信模型。并且在研究 Petri 网的基本特性基础上，分析了采用 Petri 网描述电力系统无缝通信的优势，给出了基于 Petri 网的电力通信无缝一致模型，为后面采用 Petri 网对电力无缝通信模型进行仿真奠定了数学基础。

## 第三章 基于 OFDM—CDMA 技术的高速电力线通信系统

### 3.1 引言

低压电力线通信(Power Line Communication)是指利用已有的低压配电网络进行语音及数字信号传输的一项技术<sup>[7]</sup>。它不需要另外架设通信线路,从而可大大降低通信成本。PLC 已经引起了业界广泛的关注,成为世界许多科研机构 and 电气公司的研究热点。利用现有的电力网作为信道,实现数据传递和信息交换具有十分广阔的前景。互联网络时代的到来,“最后一公里”的接入直接关系到互联网的普及和发展,用电力线作为“最后一公里”的接入线有其显著的优点:成本低、施工方便、一线两用,价格低廉,延伸方便<sup>[8,9,102-122]</sup>。

然而电力线不同于光纤、同轴电缆、双绞线等专用的通信媒质。已有的研究表明,低压电力线是一种复杂的通信媒体,其有限的通信带宽、无处不在的噪声、负荷变化以及一些不可预测的干扰都会严重影响信号传输的质量。同时,低压电力线具有射频信道的两个特征:多径效应和时变性。“多径效应”指信号通过直射、反射、折射等不同的多条路径到达接收机,造成信道的时延弥散性(timed dispersion),引起频率选择性衰落(frequency selective fading)。同时,信号的多路传输带来的时延扩展造成数据符号之间的相互交叠,产生码间干扰(ISI, InterSymbol Interference)。“时变性”是指信道的传递函数随时间的变化而变化,即在不同的时刻发送相同的信号,在接收端会因信道传递函数不同而收到不同的信号,引起信道的频率弥散性(frequency dispersion),导致时间选择性衰落(time selective fading)。因此,需要研究一种新的通信方案或技术来克服恶劣的电力线信道的影响<sup>[24-26]</sup>。

欲保证通信质量,提高通信速率,选择合适的调制方式是一个关键问题。传统的单载波调制系统不适用于低压电力线的高速数据传输,因为需要对信道进行多级均衡,设备复杂且收敛性差。正交频分复用(OFDM, Orthogonal Frequency Division Multiplexing)技术,则以其抗干扰能力强、带宽利用率高、结构简单、成本低等优点,为利用低压电力线实现高速数字通信提供了一个有效的解决方案。

通过低压配电网接入 Internet 需要实现不同用户的同时通信,除了考虑有效的调制和编解码方案外,还需考虑多用户通信中的多址接入方法。目前,常用的多址接入方法有固定多址接入(如 TDMA 和 FDMA)和随机多址接入(如 CDMA)等<sup>[33]</sup>。CDMA 采用了扩频通信技术,就低压电力通信而言,应用 CDMA 的主要优点如下:①抗干扰能力强,适合在低压电力线这样的恶劣通信环境下实现可靠

的数据通信；②信号的功率谱密度很低，具有良好的隐蔽性，不易被截获。它能够很好地解决电力线通信的干扰与噪声问题。

结合 OFDM 和 CDMA 的技术特点，本章提出了一种新颖的基于正交 M 带离散小波变换的 OFDM-CDMA 通信系统，给出了其数学模型。通过计算机仿真表明，该系统具有很好的抵抗信道间干扰 (ICI)、码间干扰 (ISI)、多用户干扰 (MUI) 及噪声干扰的性能。

### 3.2 电力线载波应用前景

电力线载波通信技术的发展在历史上经历了从模拟到数字及集成的发展过程。电力线载波在 10kV 线路上的应用国外自 50 年代开始，主要应用中压电网的负荷控制领域，大多为单向数据传输、速率低（有时小于 10bit/s 甚至更低），并没有形成大规模的电力线载波通信服务产业。

国内在八十年代后期多数是直接使用小型化的集成电路农电载波机实现点对点通信，也有个别采用窄带调频载波机的，使用范围很受限制。随着 10kV 线路通信需求的增长，到了九十年代末，出现了多种载波通信设备（这些设备可采用不同的线路耦合方式如：电容耦合、变压器耦合、低压耦合、陶瓷电真空耦合及天线耦合等），调制方式也在原来的 FSK 调制、PSK 调制、音频注入、工频调制、过零点检测等方式的基础上开发了先进的扩频调制方式，（如 DSS 直接序列扩频，FH 跳频，TH 跳时、交叉混合扩频、CHIRP 宽带线性调频，OFDM 正交频分多路复用等）。目前在国内使用的 10kV 电力线数据传输设备中，使用最多的还是窄带调制设备（主要是多信道 PSK 及 FSK 调制），采用扩频方式的设备也已开始崭露头角，随着市场的发展和技术的成熟，扩频载波设备必将在电力线载波中压应用方面占有越来越重要的地位。

电力线载波在 380/220V 用户配电网上的应用在九十年代后期之前只限于采用调幅或调频制式的载波电话机，实现近距离的拨号通话，也有采用专用的芯片实现近距离数据传输的。我国大规模地开展用户配电网载波应用技术的研究是在 2000 年左右，目前在自动集中抄表系统中采用的载波通信方式有扩频、窄带调频或调相。在使用的设备中，以窄带调制类型的设备为多数，其主要原因是其成本低廉。而电网上网的应用由于要求的速率至少需要达到 512kbit/s~10Mbit/s，所以无一例外地采用扩频通信方式。在各种扩频调制方式中，由于采用正交频分多路复用技术 (Orthogonal Frequency Division Multiplexing, OFDM) 调制具有突发模式的多信道传输、较高的传输速率、更有效的频谱利用率和较强的抗突发干扰噪声的能力，再加上前向纠错、交叉纠错、自动重发和信道编码等技术来保证信息传输的稳定可靠，因而成为电力线上网应用的主导通信方式<sup>[39]</sup>。

### 3.3 关键技术介绍

#### 3.3.1 正交频分复用技术

OFDM 的概念是于本世纪 50~60 年代提出来的。1970 年, OFDM 的专利被发表, 其基本思想就是通过采用允许子信道频谱重叠, 但又相互间不影响的频分复用 (FDM) 的方法来并行传送数据, 不仅可以不使用高速均衡器、有很高的频谱利用率, 而且有较强的抗脉冲噪声及多径衰落的能力。OFDM 早期的应用有 ANIGSC-10(KATHRYN)高频可变速率数传调制解调器 (MODEM)。该 MODEM 利用 34 路子信道采用相移键控 (PSK) 调制, 且各子信道载波相互正交, 间隔为 84Hz。

但是在早期的 OFDM 系统中, 发信机和相关接收机所需的副载波阵列是由正弦信号发生器产生的, 且在相关接收时各副载波需要准确地同步, 因此当子信道数很大时, 系统就显得非常复杂和昂贵。为了简化正弦信号发生器阵列, 早在 1971 年, Weinstein 和 Ebert 就提出了使用离散傅立叶变换 (DFT), 如专用的硬件快速傅立叶变换 (FFT) 电路, 实现 OFDM 系统中的全部调制和解调功能的建议<sup>[32]</sup>。因而简化了振荡器阵列以及相关接收机中本地载波之间的严格同步的问题, 为实现 OFDM 的全数字化方案作了理论上的准备。随着 VLSI 的迅速发展, 已经出现了高速大阶数的 FFT 专用芯片及可用软件快速实现的数字信号处理 (DSP) 通用芯片, 且价格低廉, 使利用 FFT 来实现 OFDM 的技术成为可能<sup>[95]</sup>。

至 80 年代以后, OFDM 的调制技术再一次成为研究的热点。例如在有线信道的研究中, Hirosaki 于 1981 年用 DFT 完成的 OFDM 调制技术试验成功了 16QAM 多路并行传送 19.2kbit/s 的电话线 MODEM。

而在无线移动信道中, 尽管存在着多径传播及多普勒频移所引起的频率选择性衰落和瑞利衰落, 但 OFDM 调制还是能够减轻瑞利衰落的影响<sup>[96]</sup>。这是因为在高速串行传送码元时, 深衰落会导致邻近的一串码元被严重破坏, 造成突发性错误。而与串行方式不同, OFDM 能将高速串行码流转变成许多低速的码流进行并行传送, 使得码元周期很长, 即远大于深衰落的持续时间。因而当出现深衰落时, 并行的码元只是轻微的受损, 经过纠错就可以恢复。另外对于多径传播引起的码间串扰问题, 其解决的方案是在码元间插入保护间隙, 只要保护间隙大于最大的传播延迟时间, 码间串扰就可以完全避免。1984 年, Cimini 提出了一种适于无线信道传送数据的 OFDM 方案。其特点是调制器发送的子信道副载波调制的码型是方波, 并在码元间插入了保护间隙以避免多径传播引起的码间串扰; 各子信道的频谱为  $\sin x/x$  形, 但由于码元周期很长, 单路子信道所占的频带很窄, 因而位于信道频率边缘的子信道的拖尾, 对整个信道带宽影响不大, 可以避免系统频偏引

起的载波间干扰。同时由于省去了升余弦滤波器，使实现的方案非常简单，因此后来的大多数 OFDM 方案都是以此为原形的。

进入 90 年代以来，OFDM 的应用又涉及到了利用移动调频（FM）和单边带（SSB）信道进行高速数据通信、陆地移动通信、高速数字用户环路（HDSL）、非对称数字用户环路（ADSL）、超高速数字用户环路（VHDSL）、数字音频广播（DAB）、及高清晰度电视（HDTV）和陆地广播等各种通信系统。1991 年，Casas 提出了 OFDM/FM 的方案，可利用现有的调频系统进行数据传输。

近年来，OFDM 技术还应用在电力线载波通信中<sup>[7][33]</sup>。在低压电力线上实现高速数据传输有着广阔的应用前景和经济价值，但是由于电力线信道存在着不可预期的高噪声、多径效应和信道衰落，严重制约了高速数据的传输。OFDM 以其良好的抗噪声、抗多径效应和抗衰落的特性，成为电力载波通信中最理想的调制方式之一。德国已经利用此技术研制成功了电力载波通信用的 MODEM，其数据传输速率能达到 2Mbit/s。正交频分多路复用技术可以提高电力线网络传输质量，即便是在配电网受到严重干扰的情况下，OFDM 也可提供高带宽并且保证带宽传输效率，而且适当的纠错技术可以确保可靠的数据传输。在 OFDM 系统中各个子信道的载波相互正交，于是它们的频谱是相互重叠的，这样不但减小了子载波间的相互干扰，同时又提高了频谱利用率，还可以抵制等幅波干扰。但 OFDM 收信机复杂，成本高，要求收信大动态范围的线性放大，对瞬间干扰敏感。

随着 IEEE802.11a 协议、ETSIBRAN(Broadband Radio Access Network)和多媒体应用的引入，无线通信领域已经为 OFDM 技术的应用做好了准备。世界上许多大公司、研究团体已经充分认识到 OFDM 技术的应用前景。1999 年，在 WiLAN、Philip 等公司的邀请下，来自世界六十多家公司的一百多名代表经过讨论成立了一个世界性的组织—OFDM 论坛，专门讨论 OFDM 在技术上、市场推广上的各方面问题，从而进一步推动了 OFDM 技术的商用化。由此可以预见，OFDM 技术在不久的将来一定会拥有良好的市场应用前景。

### 3.3.2 数字扩频技术

在最初的 PLC 采用扩频通信，扩频通信相对于窄带通信而言具有一定技术上的优势，主要表现在抗干扰方面。因为扩频载波信号的带宽通常较大（几十至几百 KHz），所以其受干扰的频率范围所占比例相对减小，换句话说，就是各种噪声仅能影响到一小部分所要传输的信号，而大多数的信号都能够完整、正确的到达目的地，所以对于各种类型的干扰都具有较强的抵抗性。对于最常见的脉冲噪声而言，尽管窄带通信中的接收器具有较窄的通带，使得仅有一小部分噪声能进入接收器，但由于此类接收装置中的滤波器具有高品质因素，瞬间的脉冲噪声会

使其发生自干扰，而引起它对传输来的信号产生误操作；而使用低品质因素的滤波器又会使通带带宽加大，令更多的噪声进入接收器，所以窄带通信对脉冲噪声的抵抗性较差。

然而利用扩频技术，当接收到具有较大能量的噪声信号时，接收器会在噪声的高能部分到达时自动停止工作，所以接收方仅对一小部分受影响的信号进行纠错解码即可；另外，扩频接收设备使用的滤波器具有较低的品质因素，因而不会造成系统自干扰，所以扩频技术具有较强的抗噪能力。

一般来讲，目前实现扩频有三种途径：即直接序列调制、跳频载波和利用 Chirps 扫描频率进行载波。下面分别介绍之：

**直接序列调制 (Direct-Sequence Modulation)**：此技术是将信号的能量平均分布于整个频带内，并通过伪随机序列将数据流倍加来使信号得以扩频，此序列具有数倍于所传信号二进制数据位率的符号速率。

**跳频载波 (Frequency-Hopping)**：即扩频信号在某一频率通过延续一段时间，来代表数据的一位、几位或是一位的一部分。当信号在某一频率上受到干扰时，信号就可切换到扩频带宽内的其他频率上去，因而大大降低了其受干扰的程度，这种方法对于 CW 干扰有较强的抵抗性。

**利用扫描频率的 Chirps 进行载波**：此方法多用于类似于以太网的 CSMA 网络，它利用一系列短促的、可自同步的扫描频率 chirps 作为载体，每个 chirps 一般持续 100 us，它代表了最基本的通信符号时间(UST)。这些 chirps 覆盖了 100-400 kHz 的频带，并总是以 200-400 Khz 的频率开始，继而以 100-200 KHz 的频率结束。由于 chirps 信号的线性扫描带宽比信号带宽要大得多，其线性加速度是较高的，而 CW 干扰的频率加速度一般是稳定的，所以只要将滤波器设计成只能通过具有特定角加速度的信号，就可以将 CW 干扰排除在外。另外，此种 chirps 波形还具有很强的自相关特性，这种模糊逻辑的相关性决定了所有连接在网络上的设备，可以同时识别从网上任意设备发出的这种独特波形，并且不需要在发送和接收设备间进行同步。

电力线数字扩频技术可以充分利用传输频带，实现宽带高速数据传输。扩频通信可以克服窄带噪声影响和多径影响，因此非常适合电力线通信环境。

SST 技术容易实现，自动选择高信噪比频段，抵御瞬间干扰；但码间干扰严重，需要非线性均衡器。

## 3.4 基于 OFDM-CDMA 的电力线通信模型

### 3.4.1 OFDM 数学模型

正交频分复用是一种令人感兴趣的多载波调制方式，它通过减少和消除码间串扰(ISI)的影响来克服信道的频率选择性衰落<sup>[11-23]</sup>。

设基带调制信号的带宽为  $W$ ，码元调制速率为  $R$ ，码元周期为  $t_s$ ，且信道的最大延迟扩展  $\Delta_m > t_s$ 。OFDM 的原理是将原始信号经过串/并转换变为  $N$  个子信号，转换后的码元速率降为  $R/N$ ，周期为  $T_s = Nt_s$ ，然后用  $N$  个子信号去分别调制  $N$  个相互正交的子载波。

当调制信号通过陆地无线信道到达接收端时，由于子信道的划分受到频率偏移敏感性的影响不能使  $\Delta f \rightarrow 0$ ，因此子信道仍然存在多径效应。由于多径效应带来的码间串扰的作用，子载波之间不再能够保持良好的正交状态。因而发送前就在码元间插入保护时间间隔  $\delta$ 。如果保护间隔  $\delta$  大于最大时延扩展  $\Delta_m$ ，则所有时延小于  $\delta$  的多径信号将不会延伸到下一个码元期间，因而有效地消除了码间串扰。当采用单载波调制时，为了减小 ISI 的影响，需要采用多级均衡器，这会遇到收敛和复杂性高的问题。

OFDM 调制信号可以表示为：

$$D(t) = \sum_{m=1}^{N-1} d(m) \exp(j2\pi f_m t) \quad t \in [0, T] \quad (3-1)$$

其中  $d(m)$  为第  $m$  个调制码元， $T_s$  为码元周期， $T$  为码元周期加保护时间 ( $T = T_s + \delta$ )。各子载波的频率为：

$$f_m = f_0 + \frac{m}{T_s} \quad (3-2)$$

OFDM 系统的调制原理示意图如图 3-1 所示。

图中左边的串/并单元读取一帧信号所需的串行数据流  $N_f$  bit，分为  $N$  组分别进行 QAM 等方式的映射，其中第  $i$  组包含  $n_i$  bit 的码元，且满足

$$\sum_{i=1}^N n_i = N_f \quad (3-3)$$

这里  $N$  表示传输中实际使用的子载波数量； $n_i$  bit 的码元为映射第  $i$  个子信道的调制矢量符号，即  $d(i) = a(i) + jb(i)$ ,  $i = 0, \dots, N-1$ 。信道中如果有较高的信噪比，可采用如 32QAM 映射得到 5bit/Hz 的频带利用率，如果信噪比较低，则可使用 BPSK 等映射方式，因此可以将多载波调制看成是包含了  $N$  个独立信道的 QAM 或 MPSK 调制。

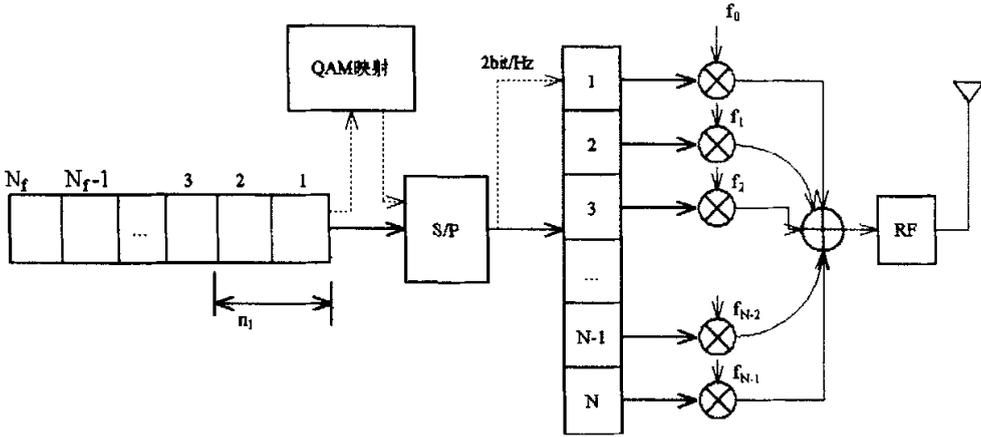


图 3-1 OFDM的调制原理图

Fig. 3-1 Schematic diagram of OFDM modulation

在常规的频分复用系统中，为了避免相邻信道间频谱的混叠，通常在信道间留出一定的保护间隔，这种方式的信道利用率较低。而 OFDM 技术则将整个频带分成多个正交的子信道，每个子信道的频谱均为  $\text{sinc}x/x$  形，各子信道频谱相互交叠，但在每个子信道载频的位置上，来自其它子信道的干扰为零，如图 3-2 所示。接收端只要将接收到的子信道信号与本地相关信号在码元期间正交，就可以做到无信道间干扰的传输。

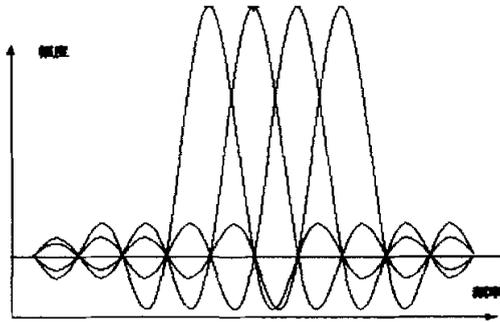


图 3-2 OFDM频谱示意图

Fig. 3-2 Schematic diagram of OFDM frequency spectrum

在接收端，其解调的原理图如图 3-3 所示：

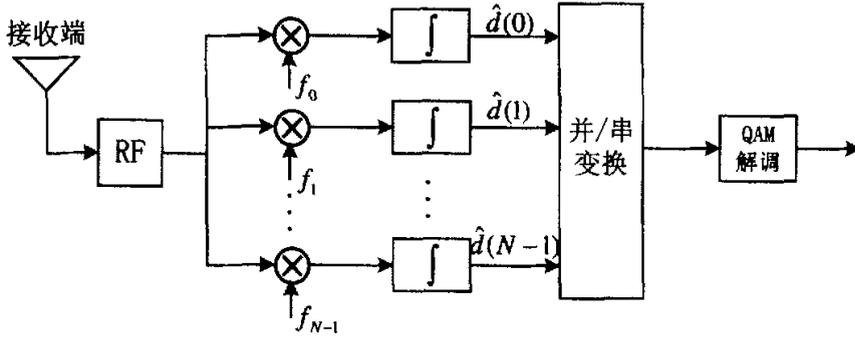


图 3-3 OFDM解调原理图

Fig. 3-3 Schematic diagram of OFDM demodulation

输入信号分成  $N$  个支路，分别用各子载波混频和积分，恢复出子载波上调制的信号，再经过并串变换和常规 QAM 解调就可以恢复出原始数据。由于子载波的正交性，混频和积分电路可以有效地分离各个子信道，如下式所示：

$$\begin{aligned}
 \hat{d}(m) &= \int_0^{T_s} \sum_{n=0}^{N-1} d(n) \exp(j\omega_n t) \exp(-j\omega_m t) dt \\
 &= \sum_{n=0}^{N-1} d(n) \int_0^{T_s} \exp(j(\omega_n - \omega_m)t) dt \\
 &= \sum_{n=0}^{N-1} d(n) \int_0^{T_s} \exp\left(\frac{j2\pi(n-m)}{T_s} t\right) dt \\
 &= d(m)
 \end{aligned} \tag{3-4}$$

### 3.4.2 等效离散小波 OFDM 通信模型

考虑一个多用户系统，假设多载波传输系统(OFDM)有  $M$  个载波频率，其符号速率为  $1/T$ ，在发送端，第  $k$  个用户的发射信号可表示为<sup>[34]</sup>：

$$s_k(t) = \sqrt{2P} \sum_{m=0}^{M-1} \text{Re}[d_{m,k}(t) e^{j2\pi f_m t}] \tag{3-5}$$

其中：

$$d_{m,k}(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} [a_{m,k}(n) - jb_{m,k}(n)] g_k(t - nT) \tag{3-6}$$

为第  $k$  个用户的符号序列；载波频率为  $f_m = f_0 + m/T$ ， $f_0$  为 RF 频率； $P$  为发射功率； $g_k(t)$  为扩频波形。(3-5) 可表示为：

$$s_k(t) = \sqrt{2P} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{m,k}(n) g_k(t-nT) \cos(2\pi f_m t) + \sqrt{2P} \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_{m,k}(n) g_k(t-nT) \sin(2\pi f_m t) \quad (3-7)$$

在接收端，接收信号为  $r(t)$ ，则第  $k$  个用户的第  $m$  个载波上的解调输出为：  
同相分量：

$$a_{m,k,I}(n) = \int_{-\infty}^{\infty} r(t) g_k(nT-t) \cos(2\pi f_m t) dt \quad (3-8a)$$

正交分量：

$$b_{m,k,Q}(n) = \int_{-\infty}^{\infty} r(t) g_k(nT-t) \sin(2\pi f_m t) dt \quad (3-8b)$$

不失一般性，假设  $f_0 = m_0/T$  ( $0 \leq m_0 < 1$ )， $f_m = (m+m_0)/T$ ，对  $s_k(t)$  进行过取样，采样时间为  $t = (l+l_0)T/2M = (l+l_0)\Delta$ ， $\Delta = T/2M$ ， $P=1/2$ ，则(3-7)可表示为：

$$\begin{aligned} s_k(l) &= s_k(t) \Big|_{t=(l+l_0)\Delta} \\ &= \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} a_{m,k}(n) g_k[(l+l_0)\Delta - nT] \cos[2\pi \frac{(m+m_0)}{T}(l+l_0)\Delta] \\ &\quad + \sum_{m=0}^{M-1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} b_{m,k}(n) g_k[(l+l_0)\Delta - nT] \sin[2\pi \frac{(m+m_0)}{T}(l+l_0)\Delta] \\ &= \sum_{m=0}^{2M-1} \sum_{n=-\infty}^{\infty} x_{m,k}(n) f_{m,k}[(l+l_0) - 2Mn] \end{aligned} \quad (3-9)$$

其中：

$$x_{m,k}(n) = \begin{cases} a_{m,k}(n) & m = 0, 1, \dots, M-1 \\ b_{m-M,k}(n) & m = M, M+1, \dots, 2M-1 \end{cases}$$

$$f_{m,k}(l) = \begin{cases} g_k(l) \cos[\frac{\pi}{M}(m+m_0)(l+l_0)] & m = 0, 1, \dots, M-1 \\ g_k(l) \sin[\frac{\pi}{M}(m-M+m_0)(l+l_0)] & m = M, M+1, \dots, 2M-1 \end{cases}$$

称为同相 (Inphase:I) 载波分量和正交 (Quadrature:Q) 载波分量， $g_k(l)$  为基带成形滤波器  $g_k(t)$  的离散取样。

在接收端，通过相似的过程可以得到解调信号的离散采样信号为：

$$\hat{x}_{m,k}(n) = \sum_{l=-\infty}^{\infty} r(l) h_{m,k}(2Mn-l) \quad (3-10)$$

其中： $r(l)$  为接收信号  $r(t)$  的离散取样信号；

$$h_{m,k}(l) = \begin{cases} g_k(l) \cos[\frac{\pi}{M}(m+m_0)(l+l_0)] & m = 0, 1, \dots, M-1 \\ -g_k(l) \sin[\frac{\pi}{M}(m-M+m_0)(l+l_0)] & m = M, M+1, \dots, 2M-1 \end{cases}$$

由(3-9)和(3-10)可知，基于 OFDM 多载波并行传输系统等效为 2M 带余弦调制滤波器组的合成(M 带小波逆变换: IWT) / 分析(M 带小波变换: WT)系统，其中两子带滤波器具有相同的频带<sup>[35-37]</sup>，如图 3-4 所示。

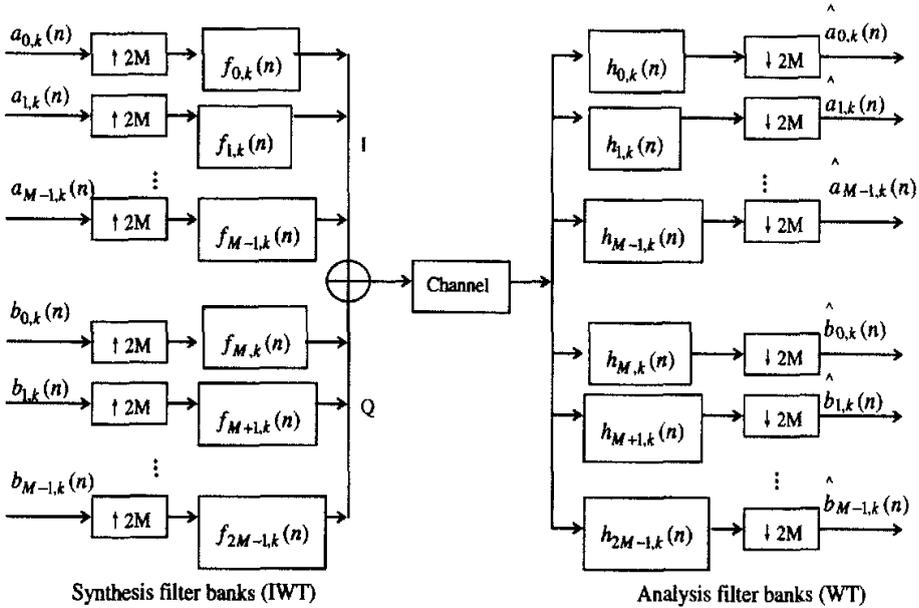


图 3-4 OFDM通信系统的等效M带离散小波结构

Fig. 3-4 Equivalent M-band discrete wavelet OFDM system

传统的多载波传输系统在离散情况下， $h_{m,k}(n)$  和  $f_{m,k}(n)$  不一定满足精确重建条件，因此存在着 ISI 和 ICI<sup>[35]</sup>。若采用上一节中的余弦调制滤波器组的合成 / 分析滤波器组实现多载波调制，通过约束低通原型滤波器满足一定的条件，可以确保系统具有精确重建特性，在理想信道条件下，可消除 ISI 和 ICI。

### 3.4.3 基于正交 M 带离散小波变换的 OFDM-CDMA 通信模型

2M 带余弦调制滤波器组(CMFB)可实现等效 M 带 (M 为偶数) 离散小波 OFDM 多载波并行传输系统。 $h(n)$  为线性相位低通原型滤波器，长度  $N=2mM$ ，其中  $m$  为整形，则 2M 带余弦调制滤波器组(CMFB)可表示为<sup>[36-38]</sup>：

$$f_m(n) = c_m h(n-M) \cos\left(\frac{\pi m}{M} \left(n - \frac{M-1}{2}\right)\right) \quad 0 \leq m \leq M-1 \quad (3-11-1a)$$

$$f_m(n) = -c_m h(n) \sin\left(\frac{\pi(m-M+1)}{M} \left(n - \frac{M-1}{2}\right)\right) \quad M \leq m \leq 2M-1 \quad (3-11-1b)$$

$$h_m(n) = c_m h(n) \cos\left(\frac{\pi m}{M} \left(n - \frac{M-1}{2}\right)\right) \quad 0 \leq m \leq M-1 \quad (3-11-2a)$$

$$h_m(n) = c_m h(n-M) \sin\left(\frac{\pi(m-M+1)}{M} \left(n - \frac{M-1}{2}\right)\right) \quad M \leq m \leq 2M-1 \quad (3-11-2b)$$

其中： $m$  表示第  $m$  个频带。

$$c_m = \begin{cases} \sqrt{\frac{2}{M}} & m \neq 0, M; \\ \sqrt{\frac{1}{M}} & m = 0, M; \end{cases} \quad f_m(0 \leq m \leq M-1)$$

而且

$$f_m(M \leq m \leq 2M-1), \quad f_m(M \leq m \leq 2M-1)$$

分别为同相 (Inphase:I) 载波分量和正交 (Quadrature:Q) 载波分量, 它们占用相同的频带 (频带宽度为  $\frac{\pi}{M}$ ), 中心频率集为:  $0, \frac{\pi}{M}, \frac{\pi}{M}, \frac{2\pi}{M}, \frac{2\pi}{M}, \dots, \pi - \frac{\pi}{M}, \pi - \frac{\pi}{M}, \pi$ 。

低通原型滤波器  $h(n)$  满足如下对称条件:

$$h(N-1-n) = h(n) \quad (3-12)$$

则:

$$f_k(n) = h_k(N-1-n) \quad (3-13)$$

上述关系意味着余弦调制滤波器组为正交 (酉) 系统, 当且仅当其满足精确重建的条件。我们将此系统称为基于正交 (Quadrature)  $M$  带离散小波的多载波并行传输系统。假设  $G_k(z), k=0,1,\dots, 2M-1$ , 为  $H(z)$  的第  $k$  个 I 型多相元素。由于低通原型滤波器具有线性相位特性,  $G_k(z)$  满足如下表达式:

$$G_k(z) = z^{-(m-1)} \tilde{G}_{2M-1-k}(z) \quad 0 \leq k \leq M-1 \quad (3-14)$$

$G_k(z)$  满足精确重建的条件是<sup>[16]</sup>:

$$\tilde{G}_k(z)G_k(z) + \tilde{G}_{M+k}(z)G_{M+k}(z) = \frac{1}{2M} \quad 0 \leq k \leq \left\lfloor \frac{M}{2} \right\rfloor - 1 \quad (3-15)$$

由此可见, 余弦调制滤波器组的设计只涉及原型滤波器的设计, 利用(3-11-1)(3-11-2), 我们可得到精确重建的 CMFB。在此基础上, 我们提出了基于正交  $M$  带离散小波变换的 OFDM-CDMA 通信系统, 如图 3-5 所示, 图中,  $c_k(m)$  和  $d_k(m)$

分别为第  $k$  个用户的扩频码和扩频解码。

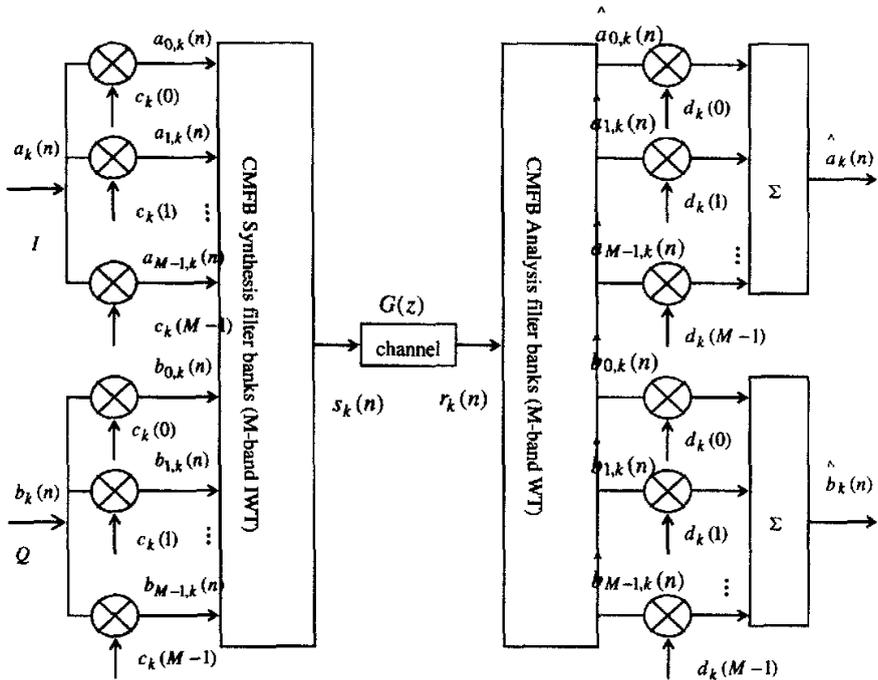


图 3-5 正交M带离散小波变换的OFDM-CDMA通信系统

Fig. 3-5 OFDM-CDMA system based orthogonal M-band discrete wavelet transform

### 3.5 仿真实验和讨论

余弦调制滤波器组的设计只涉及原型滤波器的设计，为了提高系统的性能，总希望各子带滤波器具有良好的频率特性（旁瓣最小）。为使原型滤波器的阻带衰减最大，可以最小化如下代价函数：

$$H(e^{j\omega}) = \arg \min_{\omega \in [\pi/2M + \delta, \pi]} \left| \frac{H(e^{j\omega})}{H(1)} \right| \quad (3-16)$$

其中  $\delta < \pi/2M$ 。表 3-1 给出了  $M=16$  和  $m=2$  的低通原型滤波器系数。

系统采用 16 点的正交 Walsh-hadamard 码作为扩频码。下面对  $m=2$  的 CMFB 滤波器实现的 M 带小波的 OFDM-CDMA 系统进行性能仿真，研究其抗白噪声干扰、码间干扰、窄带干扰和多用户干扰（MUI）的性能，并与基于 DFT 的 OFDM-CDMA<sup>[46]</sup> 进行比较。

表 3-1 M=16 和 m=2 的低通原型滤波器系数

Table 3-1 prototype lowpass filter parameters for M=16 and m=2

h(n)	M=16	m=2	h(n)	M=16	m=2
0	-0.0842		16	0.3031	
1	-0.0820		17	0.3557	
2	-0.0769		18	0.4103	
3	-0.0689		19	0.4659	
4	-0.0583		20	0.5220	
5	-0.0449		21	0.5774	
6	-0.0290		22	0.6313	
7	-0.0104		23	0.6827	
8	0.0111		24	0.7306	
9	0.0356		25	0.7742	
10	0.0633		26	0.8128	
11	0.0944		27	0.8457	
12	0.1290		28	0.8726	
13	0.1673		29	0.8932	
14	0.2090		30	0.9072	
15	0.2541		31	0.9146	

图 3-6 研究了 OFDM-CDMA 系统在加性白高斯噪声(AWGN)及多径频率选择性衰落信道条件下得性能。计算机仿真中的衰落信道模型为三径 Jake 弥散信道模型，三径具有独立的 Rayleigh 分布特性。接收机采用接收端采用最大比合并 (MRC) 算法。由图可知，基于 M 带离散小波的 OFDM-CDMA 系统在频率选择性 Rayleigh 衰落信道的误码率性能明显优于基于 DFT 的 OFDM-CDMA 系统的性能。这主要是由于 CMFB 滤波器实现的 M 带小波的各子带的第一旁瓣衰减较大，使得有较小的子信道间的串扰(ICI)，同时 CMFB 滤波器的精确重建特性使得码间干扰 (ISI) 减少。

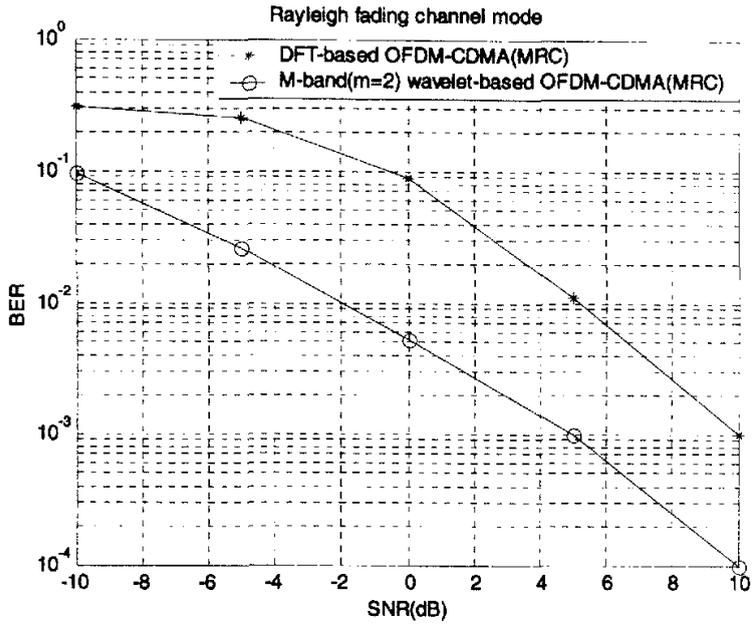


图 3-6 频率选择性衰落信道下的误码率性能

Fig. 3-6 BER in the frequency-selective fading channel

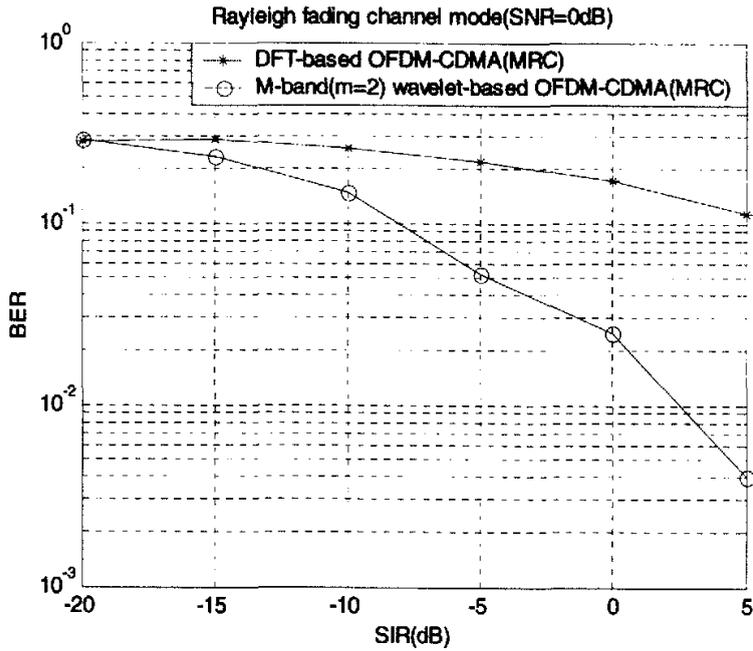


图 3-7 窄带干扰情形下的误码率性能

Fig.3-7 BER in narrow-band interference

图 3-7 为窄带干扰对系统性能的影响。仿真中的窄带干扰(NBI)为单音正弦型

干扰，相位在  $[0, 2\pi)$  均匀分布，信道为频率选择性 Rayleigh 衰落信道，信噪比为 0dB。接收端采用最大比合并 (MRC) 算法，没有采用干扰抵消算法。由图可知，基于 M 带离散小波的 OFDM-CDMA 系统在频率选择性 Rayleigh 衰落信道的误码率性能明显优于基于 DFT 的 OFDM-CDMA 系统的性能；这主要是当某一子信道的中心频率  $\omega_m$  远离窄带干扰的频率  $\omega_{NBI}$ ，则该子信道滤波器的旁瓣衰减越大，NBI 对其的影响越小。

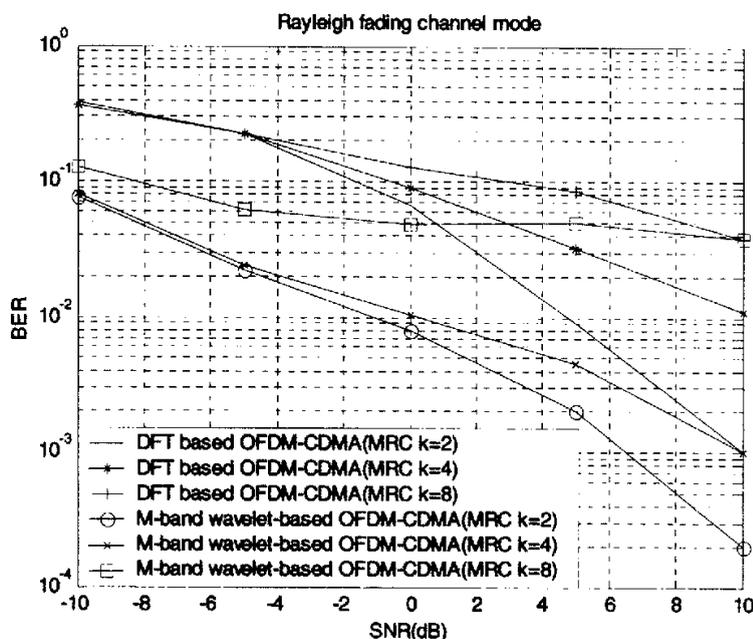


图 3-8 多用户干扰情形下的误码率性能

Fig. 3-8 BER performance in multi-user interference

图 3-8 主要研究多用户情况下系统的性能。仿真中信道为频率选择性 Rayleigh 衰落信道。接收端采用最大比合并 (MRC) 算法。对存在 2、4、8 用户情形进行了仿真，不同用户采用不同的正交 Walsh-hadamard 码，但具有相同的子信道，且各用户的发射功率相同。由图可知，基于 M 带离散小波的 OFDM-CDMA 系统在频率选择性 Rayleigh 衰落信道下的抗多用户干扰的性能优于基于 DFT 的 OFDM-CDMA 系统的性能，特别是在信噪比较低时尤为明显。抗多用户干扰的程度主要由正交扩频码的互相关函数特性决定，但由于 CMFB 滤波器实现的 M 带小波的 OFDM-CDMA 系统有较小的 ICI、ISI 和更好的抗噪声性能，且 CMFB 滤波器满足精确重建特性，使得多用户干扰程度比基于 DFT 的 OFDM-CDMA 系统低。

### 3.6 本章小结

在电力线上实现可靠的高速数据传输一直是电力通信和电力系统自动化的热门话题，同时也是一个难题。本章提出了的基于正交 M 带离散小波变换的 OFDM-CDMA 通信系统可由余弦调制滤波器组来实现，设计简单且具有更好的系统性能。从 3.5 节实验结果中可以看出它通过结合 CDMA 的扩频通信技术，比原先的 OFDM 调制技术有更多的优点：

- ✓ 抗干扰能力强，能够更好的适合在低压电力线这样的恶劣通信环境下实现可靠的数据通信；
- ✓ 信号的功率谱密度很低，具有良好的隐蔽性，不易被截获。
- ✓ 采用 CDMA 使用伪随机码能够很好地解决电力线通信的干扰与噪声问题，获得较小的 ICI、ISI 性能指标。

## 第四章 一种基于 UCA 的远动通信模型性能分析

### 4.1 引言

为了制定一个应用行业的共同遵守的标准，克服目前众多通信协议不统一的情况，美国 EPRI 联合厂商制定了 UCA 体系结构，主要内容包括控制中心之间通信和变电站内部的通信协议，控制中心之间采用了 IEC 60870-6 中的 TASE.2 标准，而在变电站及馈线通信系统中提出了实时现场设备模型 (GOMSFE)<sup>[98]</sup>。在控制中心及变电站之间的远动通信，在目前的 UCA 版本中没有确定的模型，提到可以采用 TASE.2 和 GOMSFE 模型<sup>[97]</sup>。UCA 具有面向对象模型建模技术的特点，已经被 IEC TC57 工作组采纳，吸收为 IEC-61850 的一部分<sup>[100,102]</sup>。

本章以 UCA 的 TASE.2 远动通信为例，详细分析 TASE.2 的通信模型和服务模型，并根据 TASE.2 没有统一建模的缺点提出了 O<sup>2</sup>PSIM 对象建模方法，并且采用 OPN (对象 Petri 网) 对 O<sup>2</sup>PSIM 进行模型仿真。不仅从理论上对电力的模型进行了建模，而且还开展了现场试验，为以后的研究打下良好的基础。

#### 4.1.1 UCA 简介

UCA 主要的内容包括两个部分：实时数据库部分(这里指 TASE.2<sup>[102]</sup>)和实时现场设备部分(如 GOMSFE<sup>[98]</sup>和 CASM 模型<sup>[99]</sup>)，图 4-1 给出 UCA 的组成及层次图。UCA 的使用远远超出了电力系统的范围，它可以适用于任何具有类似要求的应用领域，如变电站自动化、发电厂、工厂自动化、化工厂等。

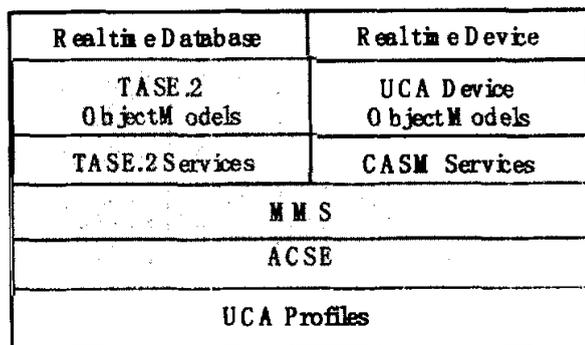


图 4-1 UCA 应用层的组成

Fig. 4-1 Hierarchy of UCA application layer

TASE.2 和现场设备模型都采用面向对象的方法，根据外部可观测的数据和行

为，对实际的控制中心进行描述。UCA 中对对象及关系的描述均基于 MMS，具体的网络握手交互过程及报文格式均由底层的协议实现。UCA 在实现时仅需告诉 MMS 需要传送那些信息，以及相应的传送参数。这是 UCA 协议与目前我们使用其它通信协议的本质区别。而且目前大多数使用的应用层协议未考虑异构的硬件环境之间的互联，只能适合于几个特别的 EMS 系统之间的通讯。更为重要的是 UCA 通信剖面全面支持 OSI 七层开放通信模型、3 层增强模型和成事实标准的 TCP/IP 协议等<sup>[100]</sup>，因此对网络的适应能力非常的强，因此为运动的网络化打下基础。

## 4.2 网络化远动通信

在电力自动化系统通信存在着大量的协议，有一些是通信标准，有一些是正在应用的标准。而且每一个标准往往仅仅覆盖了通信需求的一部分。过去由于没有国际化统一的通信协议，这些通信协议往往不能兼容，并且随着时间的推移，这种不能兼容的协议还在不断增加。目前一些标准化工作组正在系统解决这些发展过程中互联互通操作性的问题，并且致力于通过用户和设备供应商一起制定标准来达到经济适合可靠的解决方法。

TCP/IP 技术的发展逐渐成为当今网络的主导协议，在全世界得到广泛的应用。而且网络带宽指数级增长，使得一些对实时性要求很高的如视频/语音数据能够走在基于分组的包交换中。这种采用非实时的网络承载实时网络的思想延伸到电力系统中。传统的电力系统远动通信通常都是采用专线方式进行数据的传递，今后将逐步过渡到网络化通信，即实现网络化远动通信，如图 4-2 所示，变电站子站与主站之间全部采用网络连接，不同于传统的专线访问，提高了数据的传输效率，也避免了今后各种繁多的协议转换。

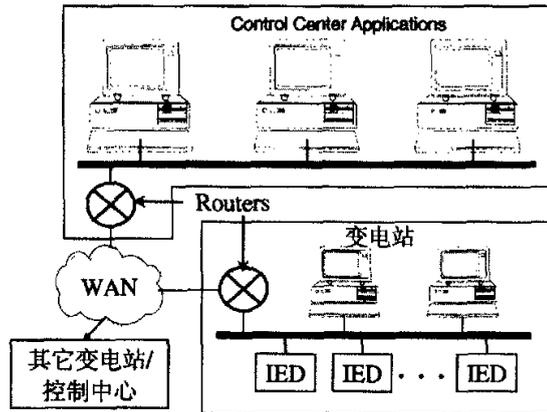


图 4-2 网络化远动通信结构图

Fig. 4-2 Networked tele-control communication architecture

### 4.3 基于 TASE.2 通信模型

控制中心部分即 TASE.2 可使电网控制中心与其它电网控制中心/区域控制中心/独立发电厂/变电站等通过广域网(WAN)进行数据交换。

TASE.2 为控制中心之间交换实时数据规定了一种机制,为远方控制中心的设备控制/通用消息传送和程序控制提供了支持。

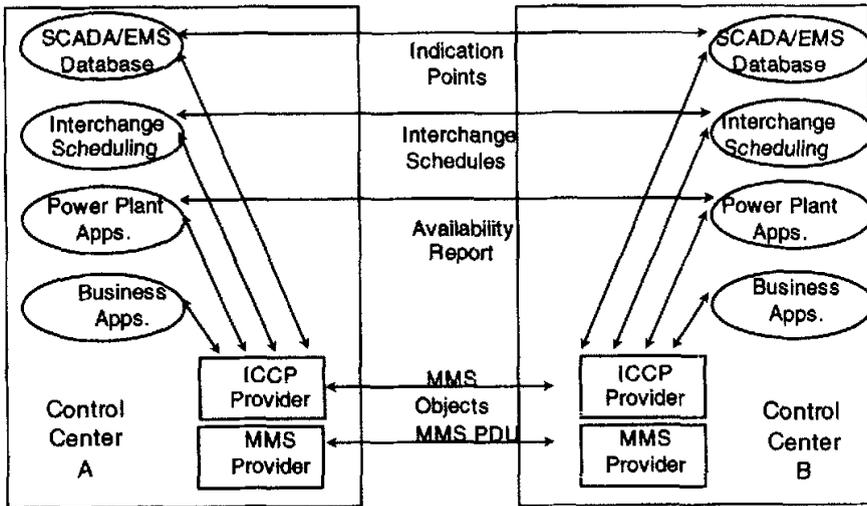


图 4-3 TASE.2的数据交互过程

Fig. 4-3 Data exchange procedure with TASE.2

从图 4-3 可以看出, TASE.2 协议基于另一个应用层协议(MMS), 各种应用都是基于对象, 并映射到 MMS 数据包中, 通过网络进行传输。

TASE.2 服务程序可以与 EMS 共享数据库, 与其它 EMS 应用程序运行在相同的软硬件环境中, 把变电站的通信作为 EMS 的一种应用。TASE.2 对象丰富, 包括应用于监控和数据采集的信号点模型、控制点模型、帐目传送模型、设备停运模型、信息缓冲器、发电厂对象、通用数据报告对象、数据相应模型, 这些模型兼容了 IEC 60870-5-101/104 协议的所有对象模型<sup>[123]</sup>, 全部 60870-5-101 的对象模型可以映像到 TASE.2 中, 因此选择合适的子集可以满足网元与调度中心之间的实时数据交换。

#### 4.3.1 TASE.2 的对象模型描述

对于远动通信而言, 有两个主要功能是最基本的: 控制和信号指示。控制功能与输出的数据有关, 而信号指示功能则与输入的数据有关。最近一种概念是认

为控制和信号指示应是一个复合体，其数据既可能是输出也可能是输入(即双向的)<sup>[127]</sup>。

从远动信息所提出数据范围总体看来，需要的基本对象模型是：信号指示点和控制点，属性有点值、质量、操作前选择、时间标记和值变化计数器等<sup>[127]</sup>，这些属性用以满足数据交换所需的功能。信号点和控制点可组合成单一的逻辑模型，用以表示一个设备，该设备控制功能是通过表示它的成功/失败的状态实现的。此种组合的逻辑模型会导致相同的逻辑属性，并作为独立的模型映射到相同的MMS类型上。

这里以一个信号点表示一个实际的输入点，采用统一对象定义如下：

Object: **Signal Point** (Read Only)

Key Attribute: PointName

Attribute: PointType (REAL, STATE, DISCRETE)

Constraint PointType=REAL

Attribute: PointRealValue

Constraint PointType=STATE

Attribute: PointStateValue

Constraint PointType=DISCRETE

Attribute: PointDiscreteValue

Attribute: TimeStampClass: (TIMESTAMP, *TIMESTAMPEXTENDED*,  
*NOTIMESTAMP*)

Constraint: TimeStampClass = TIMESTAMP

Attribute: TimeStamp

Attribute: TimeStampQuality: (VALID, INVALID)

Constraint: TimeStampClass = *TIMESTAMPEXTENDED*

Attribute: TimeStampExtended

Attribute: TimeStampQuality: (VALID, INVALID)

Attribute: etc.

.....

主要属性含义如下：

**PointName** 本属性能唯一地标识对象。

**PointType** 本属性标识输入点的类型，且必须是 REAL（实型）、STATE（状态量）、DISCRETE（计数型）三者之一。

PointRealValue 若 PointType 属性是 REAL，则是信号点的当前值。

PointStateValue 若 PointType 属性是 STATE，则是信号点的当前值。

PointDiscreteValue 若 PointType 属性是 DISCRETE，则是信号点的当前值。

**TimeStampClass**

若信号点加上时间标记，则 TimeStampClass 属性值为 TIMESTAMP；反之，值为 NOTIMESTAMP。

**TimeStamp**

本属性标记信号点的值最后一次变化的时间（属性 PointRealValue, PointStateValue, PointDiscreteValue），时间分辨率是 1s。从端设备采集到信号点值后，应尽早设置时间标记。

**TimeStampExtended**

本属性标记信号点的值最后一次变化的时间（属性 PointRealValue, PointStateValue, PointDiscreteValue），时间分辨率是 1ms。从端设备采集到信号点值后，应尽早设置时间标记。

**TimeStampQuality**

如果 TimeStamp 属性的当前值中含有最近变化的值的时间标记，则 TimeStampQuality 的属性值为 VALID；反之，值为 INVALID。

当调度中心访问网元的资源包括数据值、电能量、设备、程序、事件等。相互资源共享必须受到双边协议的控制，双边协议在 TASE.2 中存放在双边协议表中（Bilateral table）中。任何一个控制中心要想访问另一个控制中心的资源，必须取得双方的同意。被访问的网元（子站）是 TASE.2 的服务器，主站方是 TASE.2 客户。只有出现在 TASE.2 客户端双边协议表中的资源才可能被 TASE.2 客户访问。基于网络化的远动访问一个主站要接入多个远程 RTU 提供 TASE.2 服务，所以要求 TASE.2 服务器所在的机器性能比较高。

### 4.3.2 面向对象的服务模型

电力通信将向着无缝通信的方向发展，面向对象技术将成为主流<sup>[129]</sup>。我们根据无缝通信的思想，提出统一的面向对象电力系统信息模型（Oriented-Object Power System Information Model, O<sup>2</sup>PSIM）。O<sup>2</sup>PSIM 吸收了 UCA 面向对象和通信剖面的优点，采用统一的面向对象模型、服务，对所有变电站对象模型、市场信息对象模型及控制中心对象模型，用公用信息模型各组件模型的不同组合来定义和描述，为实现无缝通信解决了对象不统一兼容的问题。

**定义 4.3.2.1（服务原语）：**服务在形式上的一组接口原语（或操作）或操作。它采用简单的四种服务原语请求（Request）、响应（Response）、指示（Indication）、证实（Confirm）来对电力系统的事件进行描述：

**请求（Request）：**用户实体要求服务提供者做某项工作。

**指示（Indication）：**用户实体被告知某事件发生。

**响应 (Response):** 用户实体表示对某事件的相应。

**确认 (Confirm):** 用户实体收到关于它的请求的答复。

图 4-4 为面向对象电力系统信息模型 O<sup>2</sup>PSIM 剖面图。采用上述定义四种服务原语，能概括所有的网络行为，满足电力系统通信的需求。

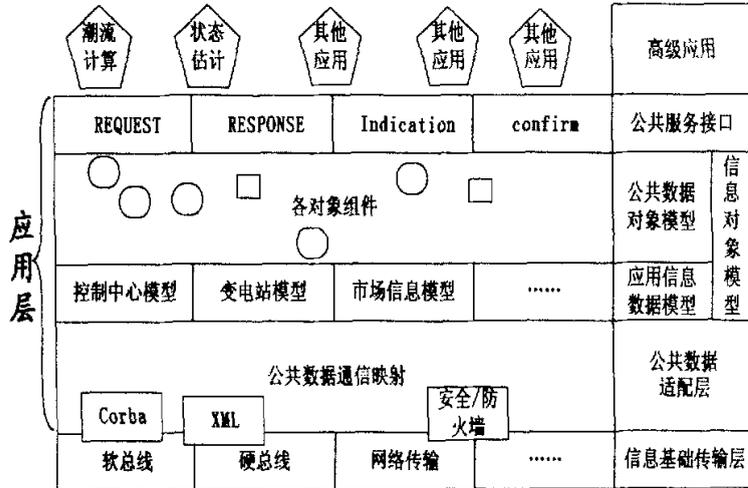


图 4-4 面向对象电力系统信息模型(O<sup>2</sup>PSIM)

Fig. 4-4 Oriented-object power system information model

图 4-5 是控制操作的一个最简单的实例，该图表示 TASE.2 和 MMS 服务的序列及其相关的请求、指示、应答和确认。以一个信号点信息提取的操作 (Signal Point) 过程为例，控制中心获取变电站网元的远动信号点 (Signal Point) 信息的过程为：

- 1) 连接请求 (服务用户请求建立一个连接)  
**connect-request** 变电站 RTU 服务单元得到指示:
- 2) 连接指示 (服务提供者向被呼叫者示意, 有人请求要获取数据)  
**connect-indication** 控制中心侧自动应答相应:
- 3) 连接响应 (表示被呼叫方同意建立数据传输连接)  
**connect-response** 远动信息开始传输
- 4) 连接证实 (服务提供者通知控制中心远动信息可以发送。)  
**connect-confirm** 以上为连接建立过程。

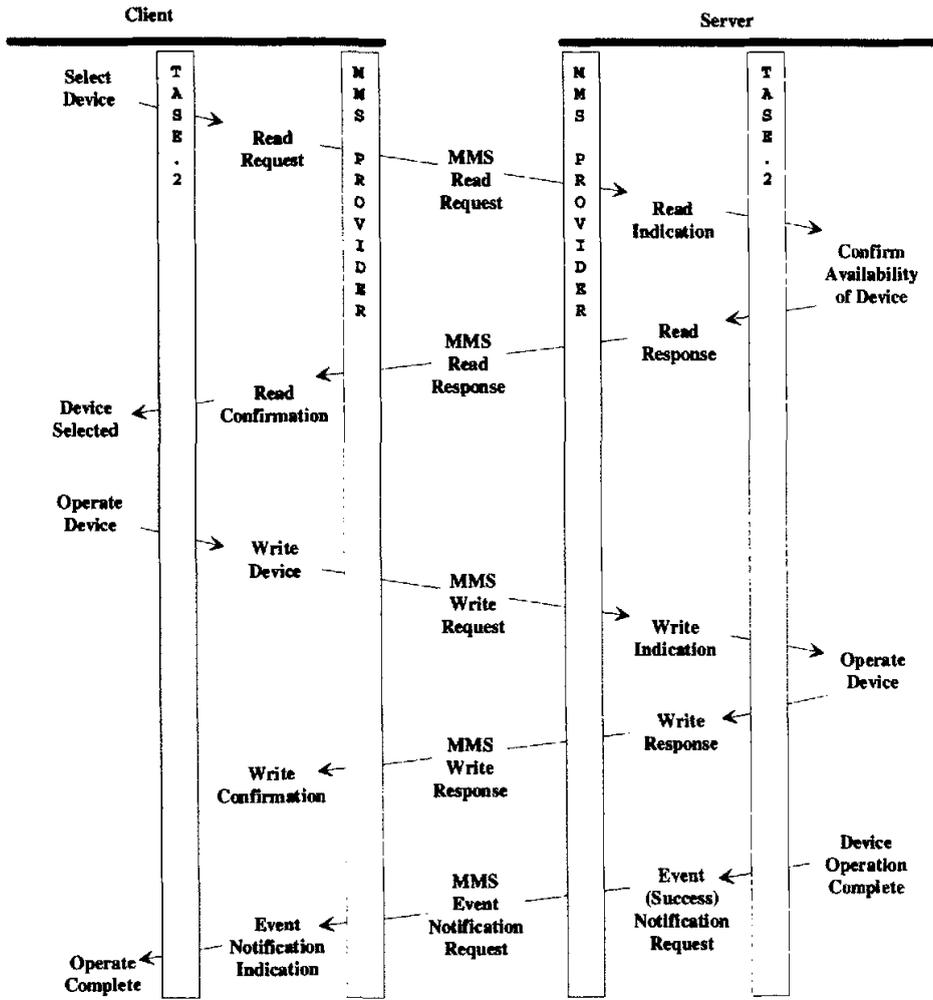


图 4-5 统一信息模型的操作控制系列

Fig. 4-5 Order of device operation in uniform information model

#### 4.4 O<sup>2</sup>PSIM 的 OPN 模型

从本质上，电力监控和调度系统属于电力行业的监控系统或网络管理系统。在目前各行业的监控系统中，计算机网络和电信网络的监控系统是比较成熟的 [130-134]。实际上，所有行业的监控系统经过抽象都是类似的，不同在于监控的对象和监控的性能要求不同。鉴于目前对电力监控和调度系统抽象的模型不多，我们经过对计算机网络管理和电信网络管理系统最新技术的研究，并经过抽象，结合电力系统本身的特点，提出基于 Petri 网和面向对象的电力监控和调度系统 O<sup>2</sup>PSIM 的建模方法，该方法特点如下：

- ◇ 可以利用 UCA 面向对象的特点；

- ◇ 利用 Petri 网的数学背景，可以对系统行为和性能进行分析；
- ◇ 应用 Petri 网的仿真工具，可以对模型进行仿真；
- ◇ 利用 Petri 网对 XML 的支持，可通过 XML 把 Petri 网转化为面向对象的编程语言。

在系统分析阶段，利用本模型可以更好地对系统的设计方案进行评价，避免因方案设计不当引起的资源浪费或造成的系统运行故障。

#### 4.4.1 远程监控中的面向对象的建模

本节通过对计算机网络管理和电信网络管理系统的分析，并结合 O<sup>2</sup>PSIM 的特点，提出 O<sup>2</sup>PSIM 面向对象的建模方法。

##### 4.4.1.1 计算机网络的远程监控系统

计算机网络监控一般采用基于 SNMP<sup>[131]</sup> (simple network management protocol)。图 4-6 为基于 SNMP 的计算机网络远程管理系统。该系统一般采用代理的概念，下层通信采取 TCP/IP 协议，并采用轮询的方法，图 4-7 为该系统的通信机理。目前该系统的使用最广泛的网管系统。

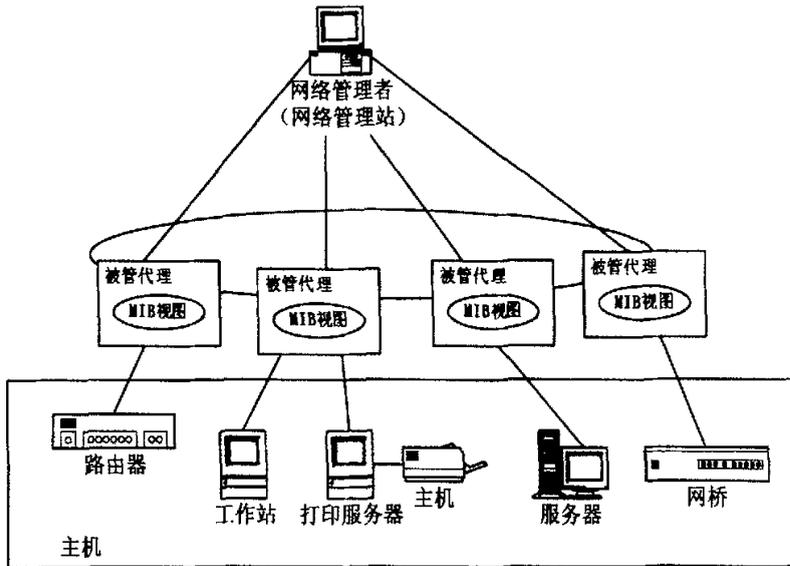


图 4-6 基于 SNMP 的计算机网络远程监控系统

Fig. 4-6 Tele-monitor system of computer network based on SNMP

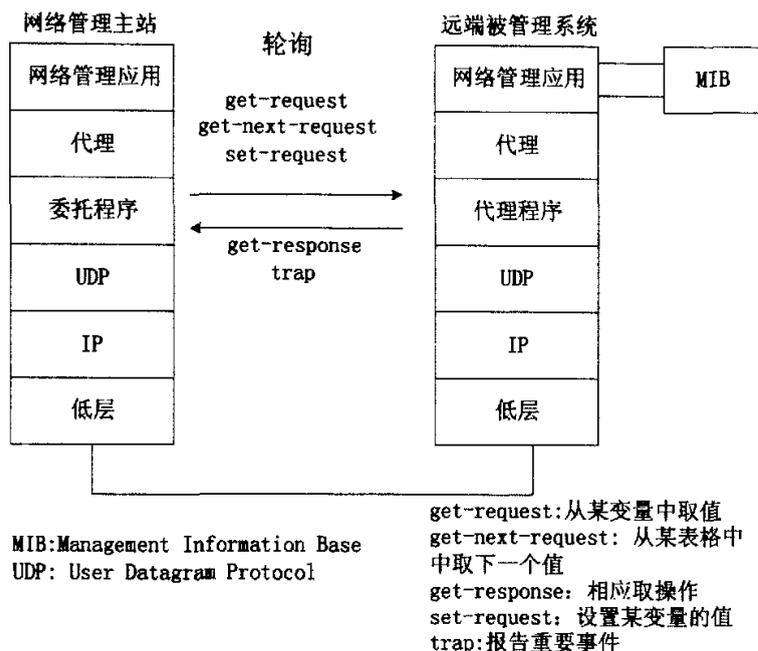


图 4-7 SNMP 的通信机理

Fig. 4-7 Mechanism of SNMP communication

#### 4.4.1.2 电信网络的管理系统

电信网络的监控系统很早就出现了，经历了如表 4-1 所示的发展过程。

表 4-1 电信监控系统的发展过程

Table 4-1 the course of development of SNMP

年代	监控系统特点
~1970	告警系统
1980~1985	监测系统（集中告警）
1985~1990	集中监控系统
1990~1995	网管系统（分散控制、集中管理）
1995~	电信管理网

可见，电信的远程监控已向网络管理发展，并逐步发展成具有国际标准的电信管理网 TMN<sup>[132]</sup> (telecommunication management network)。TMN 提供了一组标准的接口，从而使网络操作、组织管理、维护管理功能及对网络单元的管理变得容易实现。TMN 包括物理、功能、逻辑和信息模型，其中，信息模型实际上是一个跨越电信系统的抽象模型，其中主要的核心就是引入了管理者和代理 (manager/agent) 的概念，强调在面向事物 (Transaction-oriented) 处理的信息交换中采用面向对象 (Object-oriented) 的技术，主要包括管理信息模型和管理信息

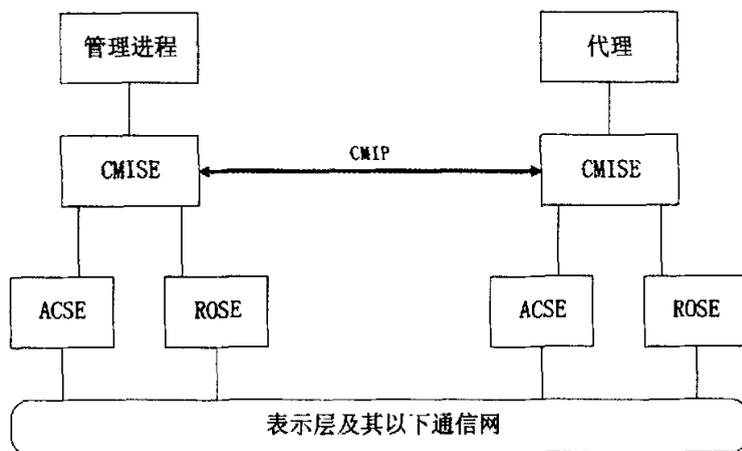
交换两个方面。

管理信息模型是对网络资源及其所支持管理活动（activity）的抽象表示。在信息模型中，网络资源被抽象为被管理的对象(managed object)。模型决定了以标准方式进行信息交换的范围，模型中的活动（activity）实现 TMN 的各种管理操作，如信息的存储、提取与处理。管理信息交换涉及 TMN 的数据通信功能 DCF，消息传递功能 MCF，主要是接口规范及协议栈。由于 TMN 的成功应用，本文应用 TMN 关于信息交换的技术用于电力监控和调度的信息。图 4-8 为 TMN 的信息模型，其中 CMIP 为公共管理信息协议。图 4-9 为 TMN 的通信机理，图 4-10 为 TMN 的通信过程。



图 4-8 TMN 的信息模型

Fig. 4-8 Information models of TMN



CMIP: Common Management Information Protocol: 公共管理信息协议  
 CMISE: Common Management Information Service Element: 公共管理信息服务单元  
 ACSE: Association Control Service Element: 联合控制业务单元  
 ROSE: Remote Operations Service Element: 远端操作业务单元

图 4-9 TMN 信息模型的通信机理

Fig. 4-9 Mechanism of TMN information models

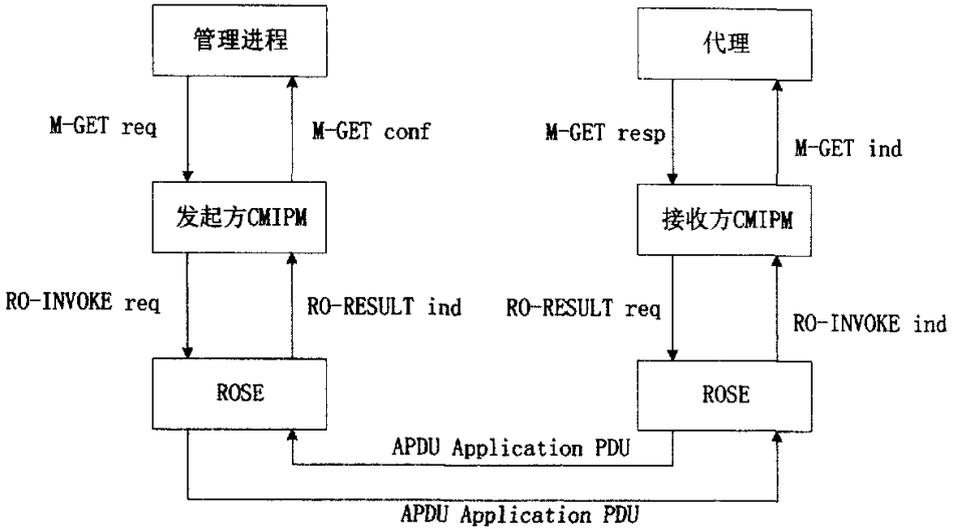


图 4-10 TMN 信息模型的通信过程

Fig. 4-10 Communication process of TMN information models

#### 4.4.1.3 O<sup>2</sup>PSIM 的面向对象的信息交换模型

图 4-11 为 O<sup>2</sup>PSIM 的面向对象的信息交换模型，其中，控制中心、控制点、信号点封装为对象，UCA 所规定的有关点设备的定义作为对象的属性，O<sup>2</sup>PSIM 的四种服务原语作为对象的操作。控制中心与点设备之间的信息交换通过操作完成。

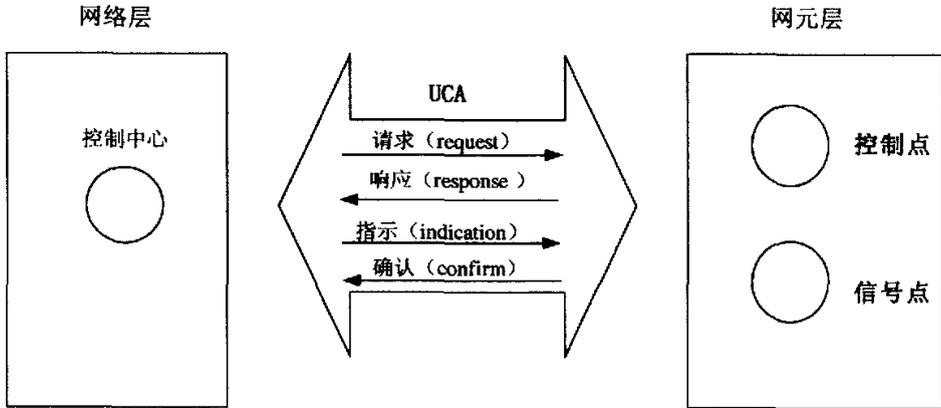


图 4-11 O<sup>2</sup>PSIM 的信息交换模型

Fig. 4-11 Information exchange models of O<sup>2</sup>PSIM

#### 4.4.2 O<sup>2</sup>PSIM 的 OPN 模型

Petri 网为系统建模、分析的良好工具，在电信系统分析 [76,77,86,89,90]、协议

的描述中得到广泛的应用<sup>[62]</sup>。目前国际上几个标准化组织如 ISO(International Organization for Standardization)、IEC(International Electrotechnical Committee)、JTC1 (Joint Technical Committee 1 Information Technology)、SC7 (Subcommittee 7 Software Engineering) 都在制定关于 Petri 网的国际标准, 包括制定<sup>[63]</sup>:

- ✧ 基于 CPN 的高级 Petri 网的概念、定义和图形描述;
- ✧ 基于 XML 语法的 Petri 的模型交换格式, 目前的主要成果为描述 Petri 网结构的语言 PNML(Petri net Markup Language)。
- ✧ 高级 Petri 网的扩展, 如分层 CPN 和时间 CPN。

CPN 为 Petri 网的高级形式, 可以描述复杂的系统。比较适合面向对象的分析 (OOA)。所谓的面向对象的 Petri 网 (Object-oriented Petri net) 实际上就是 CPN。

由于 Petri 网具有良好的规则性, 很多 Petri 网的计算机工具都支持把 Petri 网转化为脚本语言。例如 CPN 的发明人 K. Jensen 用 Java 开发的 CPN 工具 CPN Tools 把 CPN 存为 XML 格式的文本文件<sup>[62]</sup>。由于面向对象的编程 (OOP, Object-oriented Programming) 语言对 XML 的支持, 所以 CPN 也可转化直接转化为编程语言。

另外, CPN 一个非常重要的特点是具有众多的仿真工具, 可以在系统实施前进行仿真, 特别适合电力系统这种带有安全性系统分析。

#### 4.4.2.1 面向对象的 Petri 网

面向对象的 Petri 网的一种特殊的 CPN, Lee<sup>[91]</sup>和 Wang<sup>[92]</sup>等人结合面向对象的建模技术 (OOM, object-oriented modeling), 应用了 OOM 中“对象”与“信息传递”的概念, 把对象表达为一个 CPN, 称为 OPN (Object Petri net)。在一个 OPN 中, 位置分为三个集合: 输入信息位置集合、输出信息位置集合和状态位置集合, 对象与外界的信息交换主要通过输入信息位置集合和输出信息位置集合作为接口。OPN 内的变迁称为活动变迁 (Activity Transition), 所有的活动变迁不与外部交流信息。定义 4.4.1 为一个 OPN 的数学定义。

**定义 4.4.1 (OPN).** 一个 CP-网  $N=\langle P,T,C,I,I_+ \rangle$  称为 OPN, 其中:

- a.  $P=SP \cup IM \cup OM$ , SP、IM、OM 为三个互不相交的集合, 分别称为状态位置集合、输入信息位置集合和输出位置集合, 并且满足:
  - a)  $\forall p \in IM, \forall t \in T: I_+(p,t)=0;$
  - b)  $\forall p \in OM, \forall t \in T: I_-(p,t)=0;$
- b. T 称为 活动变迁, 记为 AT。

由于面向对象的编程 (OOP, Object-oriented Programming) 语言对 XML 的支持, 所以通过把 OPN 模型转化为 XML, 可以实现把 OPN 向 OOP 语言转化, 成为可执行的 OPN<sup>[66]</sup>。例如, 对类 Class-x 如下的如下定义:

```

class Class_x {
public:
int method_1 ();
void method_2 ();
...
Int method_n ();
protected
anytype inst_var;
};
    
```

可转化为图 4-12 所示的

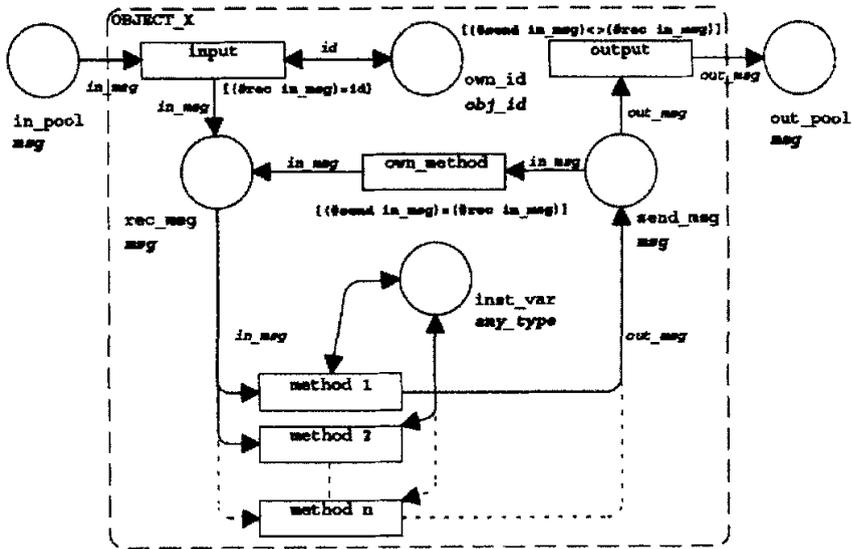


图 4-12 由编程语言类的 OPN 表示(引自[66])

Fig. 4-12 OPN denotation based on programmed language classes(extracted from reference [66])

用定义 4.4.1 描述,  $IM=\{in\_pool\}$ ,  $OM=\{out\_pool\}$ ,  $SP=\{own\_id, rec\_msg, send\_msg\}$ ,  $AT=\{input, output, own\_method, method1, method2, \dots, methodn\}$ 。

4.4.2.2 OPN对O<sup>2</sup>PSIM信息模型的描述

图4-11的O<sup>2</sup>PSIM的信息交换实际上就是两个对象之间的调用操作进行的。在我们提出的OPN模型中,控制中心、点设备分别封装成一个如图4-12的OPN。

其中IM={in\_pool}, OM={out\_pool}分别表示信息传递的接口, SP={point\_attrib, rec\_msg, send\_msg}, 其中C(point\_attrib)表示UCA定义的点设备属性。AT={input, output, request, response, confirm, indication}。request, response, confirm, indication分别表示O<sup>2</sup>PSIM的四个服务原语。

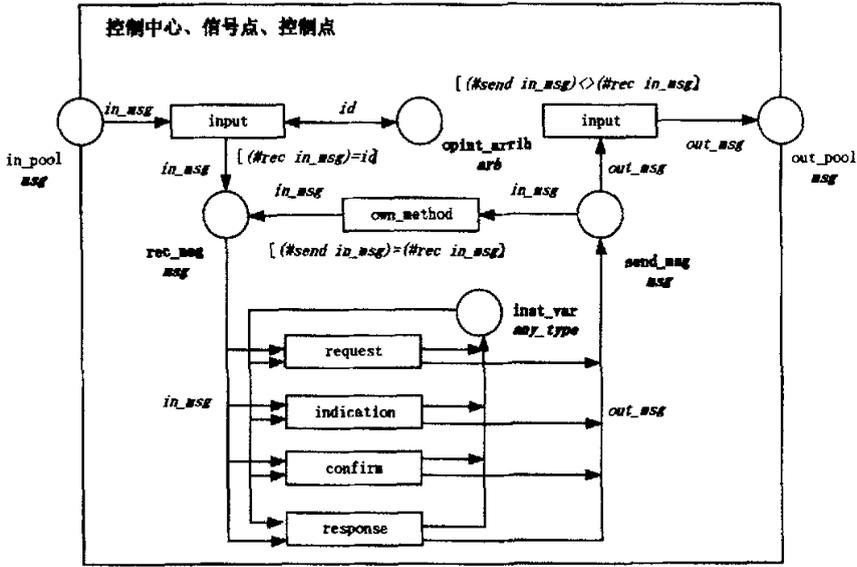


图 4-13 O<sup>2</sup>PSIM 对象的 OPN 模型

Fig. 4-13 OPN models based on O<sup>2</sup>PSIM object

O<sup>2</sup>PSIM 对象间的信息传递相当于在两个对象间的 out\_pool 和 in\_pool 之间嵌入若干个变迁  $g_i$ 。这本质上是定义 4.4.1 所定义的嵌入变换, 变迁间的必须符合定理 2.3.6.2 所述的规则。

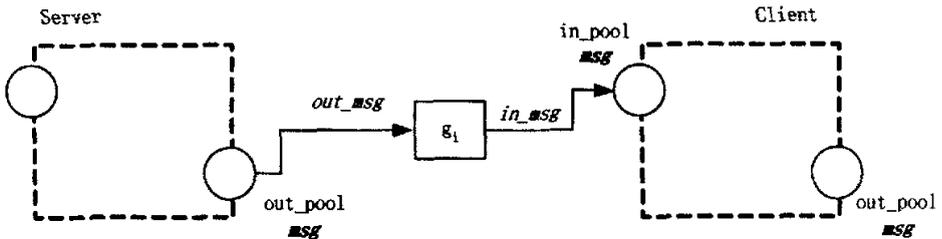


图 4-14 O<sup>2</sup>PSIM 对象传递信息的 OPN 模型

Fig. 4-14 OPN models based on O<sup>2</sup>PSIM object exchanging information

变迁  $g_i$  表达了一种抽象的网络传输过程, 在实际建模中, 如果对网络的传

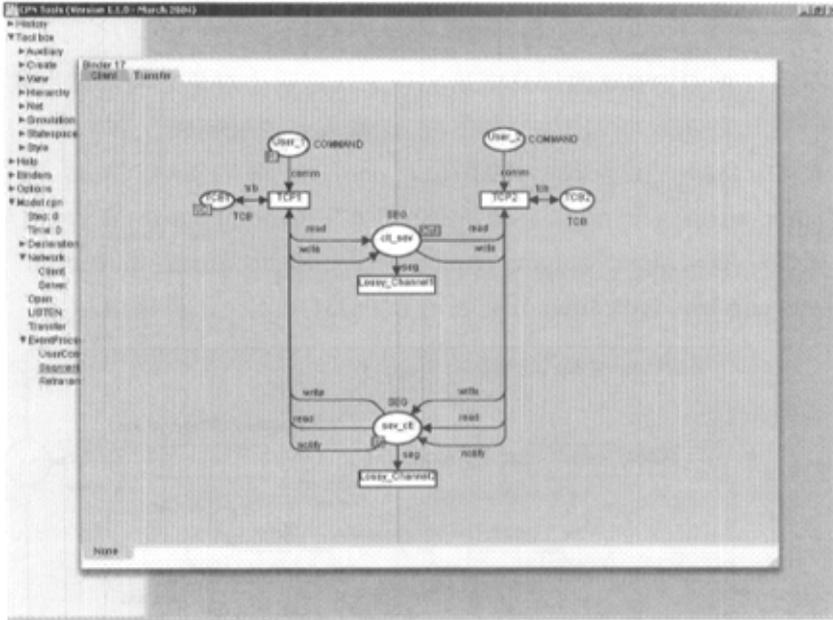


图 4-15 把变迁 gi 扩展成一个基于 TCP/IP 的 OPN 网络

Fig. 4-15 A OPN net based on the transformer from gi to TCP/IP

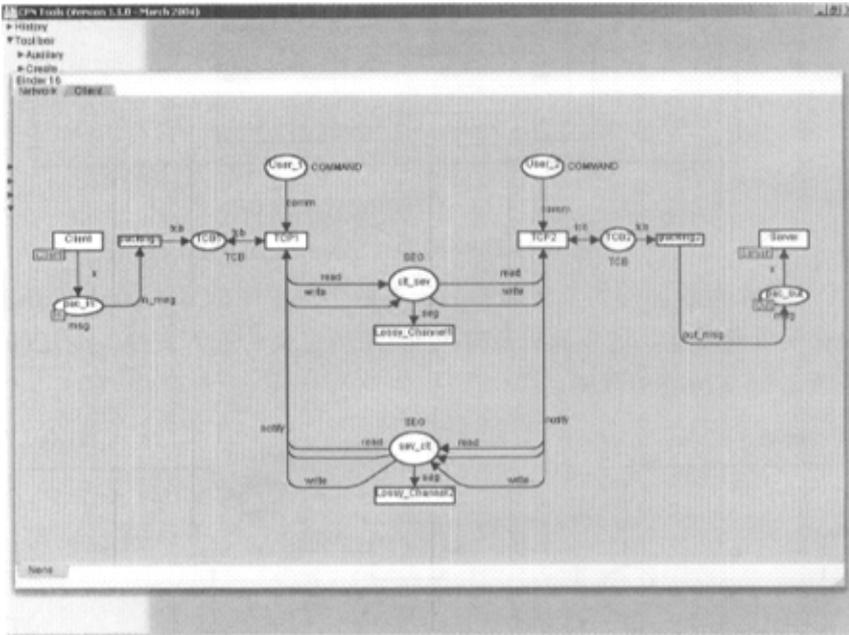


图 4-16 通过 gi 的扩展所成的基于 TCP/IP 的 O2PSIM 网络 OPN 模型

Fig. 4-16 O2PSIM OPN models based TCP/IP expanded by gi

输环境进行仿真，必须对变迁  $g_i$  进行扩展 (refinement)。在 CPN Tools 中，可使用分层 CPN 的概念，通过把变迁扩展为一个子页面。图 4-15 为使用 CPN Tools 把  $g_i$  扩展成一个基于 TCP/IP 的子页面。

变换后整个网络层的 OPN 如图 4-16 所示。在图 4-16 中，变迁 TCP1 和 TCP2 分别表示服务端和客户端传输层根据 TCP 协议的处理过程，还可以扩展成图 4-17 所示的子页。

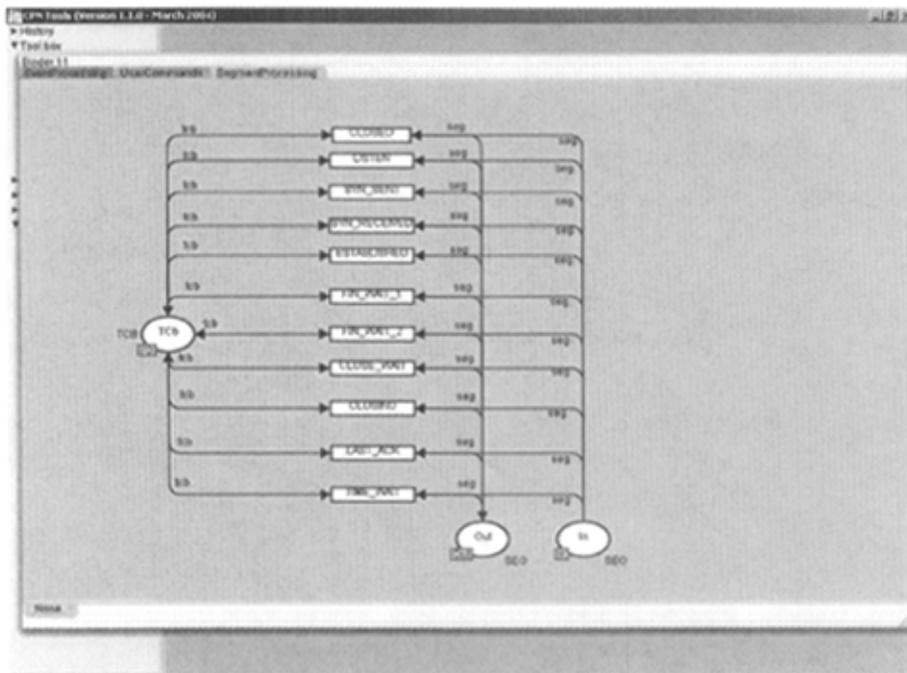


图 4-17 把图 4-16 的 TCP/IP 变迁扩展成的子页

Fig. 4-17 the subpage transferred from figure 4-16 to TCP/IP

根据 CPN 的不变量守恒变换理论，属于定义 2.4.6.1 定义的嵌入变换，在嵌入过程中必须遵守定理 2.4.6.1 的规则。

关于用 CPN Tools 对电力系统无缝通信 O<sup>2</sup>PSIM 模型的仿真可见第六章。

## 4.5 本章小节

从本质上，电力监控和调度系统属于电力行业的监控系统或网络管理系统。在目前各行业的监控系统中，计算机网络和电信网络的监控系统是比较成熟的。实际上，所有行业的监控系统经过抽象都是类似的，不同在于监控的对象和监控的性能要求不同。鉴于目前对电力监控和调度系统抽象的模型不多，我们经过对

计算机网络管理和电信网络管理系统最新技术的研究，并经过抽象，结合电力系统本身的特点，提出基于 Petri 网和面向对象的电力监控和调度系统  $O^2PSIM$  的建模方法。本章分析当前电力系统远动通信网络化趋势，提出统一的一种采用面向对象技术的电力系统信息模型 ( $O^2PSIM$ )。结合面向对象的 Petri 网在电信网的成功应用，把 Petri 网引入到  $O^2PSIM$  之中。并且通过电信网管监控网与电力调度网类似的情况，建立了能够扩展为 TCP/IP 的远动通信网络的 Petri 网络模型。这种模型正好适合验证远动通信在 TCP/IP 的非实时网络中的各种性能。

## 第五章 基于 UCA 的无缝通信点设备模型的应用

### 5.1 引言

在电力系统各种规约中，各种智能设备即点设备之间的通信规约种类最为繁多。由于商业和技术的原因，这些规约互操作性较差，点设备不能直接互相通信，必须进行协议的转换，造成了物力和财力的极大浪费。UCA 采用面向对象的技术特点，为整个网元中点设备之间的通信定义模型，并采用 MMS 等统一映射实现对各种网络协议的兼容性，较好地实现了点设备网络间的互联。然而目前 UCA 协议体系在国内用得不多，UCA 中的点设备模型在国内对技术人员和设计人员来说了解都不是很深，变电站及馈线的面向对象模型和服务映射为特点的点设备模型的研究国内还处于开始。

本章从 UCA 点设备模型开始分析，对于一个生产厂商如何采用 UCA 的文档方式来实现变电站 UCA 点设备的实现过程。并且从多个侧面分析 UCA 点设备在今后的变电站应用的通信模式，接口转换协议的过渡，并对 UCA 替代当今各种站内通信规约的实现步骤和方式，为今后变电站 UCA 的应用过渡做了理论基础。最后对 UCA 在变电站应用过程中各种数据结构类型的转换做了特点分析，为探索 UCA 的实际应用提供了理论基础。

### 5.2 基于 UCA 的点设备模型

UCA 是一体系结构（architecture）而不仅仅是一种简单的协议。UCA 2 包括了一族基本的通信协议，目的是满足各种应用环境。这些协议的选择及组织在设计上都有很大的灵活性去选择合适的技术来满足各种应用的性价比，而在设备数据层为了减少集成和厂家产品费用又维持一致性。而且 UCA 包括了详细的数据模型，定义了格式、含义、和应用数据代表的含义，这些模型的影响远远超过其它应用通信方法，并且是第一次规定多种厂家设备互操作性。UCA 主要有以下方面的特点：

**强大通信协议的兼容性：**UCA 通信剖面规范了面向连接和无连接（数据报、广播方式）两种通信，可以应用于普通的 LAN、WAN 和各种特殊的介质（比如微波）通信。支持增强通信协议（EAP）模型，把通信模型缩减为 3 层（基本的功能），以适用在低带宽环境和一些没有足够多的进程/内存能力支持所有 7 层协议的条件。UCA 体系结构对满足目前电力市场打破规制中不断增加的通信需求

[97]，有更重要的益处。从基本的网络结构应用的孤立，结合安全/密码方式在各UCA剖面，为一个开放的访问通信需求提供最为广泛的解决方案。UCA提供了允许被“外部”应用安全访问特定的系统（用户）的能力，但是又保持它们与网络和设备基础组织的细节隔离。

**对象建模技术：**UCA的最大的特点就是定义了详细的点设备对象模型，它被用来标识需要支持的各种设备类型、基本功能及各种变量和算法等。比如说，电压调整器/抽头变换器等厂商在设计生产设备时一致使用设备模型，他们的每种设备当通过MMS被访问时，就提供通用变量集、通用的名称（比如“tap\_positon”）和数据格式，在满足基本的功能的同时能够独立于厂商、模型或者版本的不同能够“即插兼容”。

UCA使用了MMS技术<sup>[99]</sup>，UCA采用标准商业的配线PC和 workstation 报文（如：MMS浏览器），在UCA企业的各自用户任何地方都能（遭受安全和访问控制）直接地从变电站设备、馈线设备和用户接口（其他）访问实时数据。UCA支撑剖面的可扩展性，自我描述（self-describing）功能为厂商独立设备对象模型提供了应用企业实时数据无缝通信。

### 5.2.1 网元基本结构

典型的网元级综合自动化（SAS）包括一些传感器和用来处理各种不同采集数据功能的计算机设备，实现数据采集、数据过滤和数据存储到人机接口（MMI）或自动保护服务等功能。各种点设备都具有各种不同特征，在本文中全部称作IED，它可以指代任何具有处理数据能力的点设备。

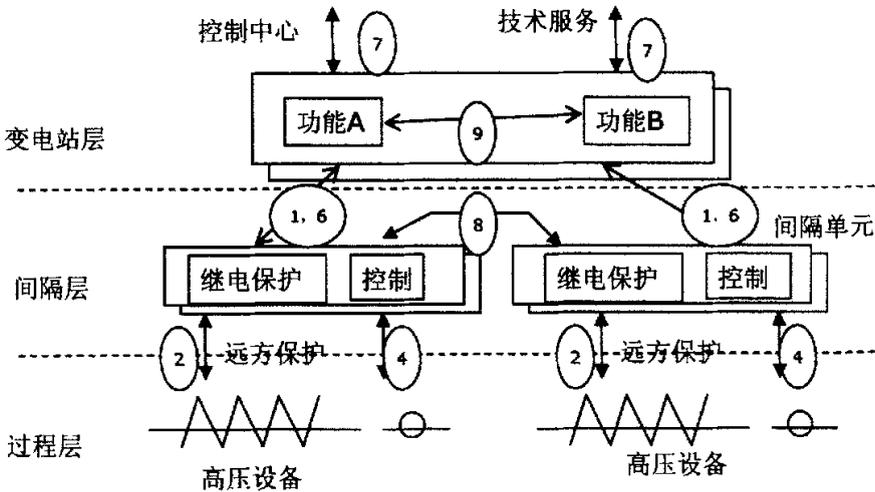


图 5-1 变电站自动化接口模型

Fig. 5-1 Substation Automation System interface model

通常网元（变电站为例）自动化系统从功能上可分为三个层面（见图 5-1）：网元应用层（变电站层）、点设备层（间隔层）及设备（过程）层，各层之间分 10 个不同的逻辑功能接口。逻辑接口可以采用不同的方法映射到物理接口，通常站总线一般覆盖逻辑接口 1,3,4,8,9，过程总线可以覆盖逻辑接口 4,5。

## 5.2.2 网元通信协议

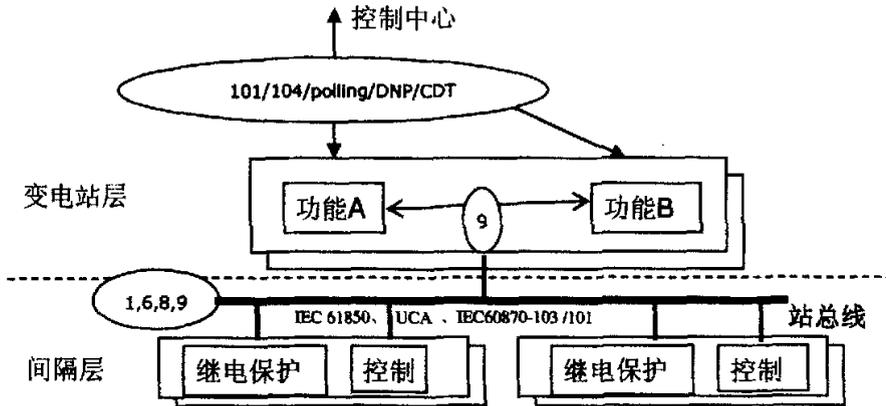


图 5-2 点设备通信协议接口模型

Fig. 5-2 Communication protocols models in substation device

图 5-2 给出了点设备通信协议接口模型。图 5-2 中站总线是连接 SAS 系统（或传统的 RTU）和间隔层点设备的通道，站总线从过去点总线技术发展到了基于 TCP/IP 的以太网总线技术，网元间内部的通信协议有 IEC 60870-5-101/103、UCA、IEC61850 等国际通用标准，也有厂家自己开发的通信协议。现场总线种类也繁多，如 Profibus、Canbus、LonWorks 等。

虽然 IEC 60870-5 系列标准是为了适应电力系统（包括 EMS SCADA 和 DMS）及其他公用事业的需求而制定的，用来解决目前市场上设备之间不兼容、互不操作性，但是 60870-5 系列标准仍然是面向字符的技术，采用增强型三层网络结构，对各层都有自己定义的包结构，其扩展性不强，可重用率不高，不能兼容各种已有网络，也跟不上快速发展的网络技术。比如当 TCP/IP 技术得到广泛应用之后，IEC TC57 不得不在 IEC 60870-5-101 的基础上，又制定了 IEC60870-5-104 《利用标准传输协议子集 IEC60870-5-101 的网络访问》。IEC60870-5-104 采用 IEC60870-5-101 的平衡传输模式，为了兼容 TCP/IP 协议传输远动信息，通过 PAD（分组装拆）数据网络，对 101 的 APDU 的结构做了相应的改变，在实现和应用 IEC870-5-104 过程中，IEC870-5-101 的资源得不到充分的利用。

而 UCA 采用面向对象的技术特点,为整个网元中点设备之间的通信定义模型,并采用 MMS 等统一映射实现对各种网络协议的兼容性,较好地实现了点设备网络间的互联,UCA 已被吸收成为 IEC 61850 的一部分。

### 5.2.3 UCA 通信剖面

UCA 采用面向对象技术,面向对象技术的特点有资源的可重用性、可管理性、可扩展性,并定义服务和 MMS 映射来满足将来快速发展的网络技术,其扩展性、兼容性、可靠性都得到增强。

类似于电信通信网络的应用,UCA 也提供在各应用之间、各应用之内互联的网络解决方案<sup>[99]</sup>,各层能够独立设计应用,增强了协议体系的开放性。对于物理层,UCA 规范在满足上述约束的条件下可基于(双)总线、(双)有线(光纤)环、无线链路等构成系统之间的可靠物理连接<sup>[100]</sup>。

图 5-3 所示,为目前成为应用最为广泛的 TCP/IP 协议套作在 UCA 中的通信应用。TCP/IP 是既成事实的标准,它是一个协议套,不是简单的 TCP 及 IP 的组合,它还包括 UDP 等等其他的从物理层到传输层的协议。它有以下的一些优点:1) TCP/IP 市场大的占有率,2) 硬件设备(如网桥,交换机)物廉价美 3) 能够平滑过渡,实现从 10M 到 100M 无缝兼容,现在已经在大规模使用的商用 1Gbit/s 的以太网、10G 以太网正在成熟等。

UCA 支持完整的通信体系结构。UCA 采纳 ISO 标准,OSI(开放的互联系统)和应用最广的 TCP/IP 协议,来满足任意设备,在任何地方都能够对数据访问。它根据网络数据对实时性及其可靠性的不同要求,同时支持面向连接(TCP)和无连接服务(UTP)的服务来满足需求,网络支持组播、广播、单播(点对点)网络连接方案。

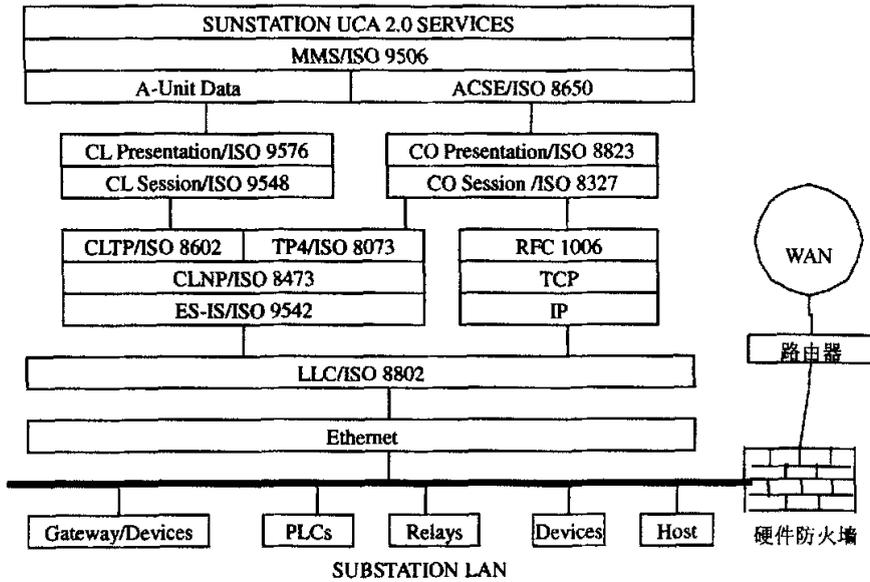


图 5-3基于TCP/IP协议的UCA 通信剖面图

Fig. 5-3 UCA communication profile based on TCP/IP protocol suite

### 5.2.4 UCA 通用对象模型

在UCA中基本的任务之一就是为点设备（如继电保护）及其所有的点设备（IED）建模。这些IED模型的建设被称为通用变电站及馈线设备对象模型（Generic Object Models for Substation and Feeder Equipment, GOMSFE）。

GOMSFE规范了：逻辑现场设备对象模型（Logical Field Device Object Models）、基本构建块（Basic Building Bricks）、功能组成（Functional Components）、公用数据类（Common Data Classes）、公用组成（Common Components）、标准数据类型（Standard Data Types）。层次上采用面向对象中类继承的关系，建模的步骤就是先从标准数据类型、标准数据类和功能块组成基本的模型块，然后利用它标准的、可以重利用的属性，加上更高层的功能描述和规范定义模型。各个不同的对象都是极大简化的标准类型和对象建模，因此也满足了广泛模型需要。

在UCA中GOMSFE共定义11个功能组（Functional Component）、28个基本数据类型、335个数据类，基本模型块（Bricks）定义了8个功能域（Functional Area）、各个域中定义了各种模型共54种，见表5-1所示。

表 5-1 GOMSFE基本功能块及其功能域的定义

Table 5-1 GOMSFE definition of based bricks and function areas

功能域 (Function Area)	模型数量 (Numbers of Models)
Globe	1
Basic	8
Generic I/O	5
<b>Measurements</b>	<b>5</b>
Transformers	6
Switches	5
Reactive	2
Protection	22
Total	54

Model	Description
MMXUr	Polyphase Measurement Unit
MMTRn	Polyphase Electric Meter
SYNCn	Synchronism Check Unit
TEMPn	Temperature Measurement Unit
PQUNn	Power Quality Measurement Unit (TBD)

每个物理设备可以根据用户需求选择一个或者多个功能块 (Brick) 来构建。

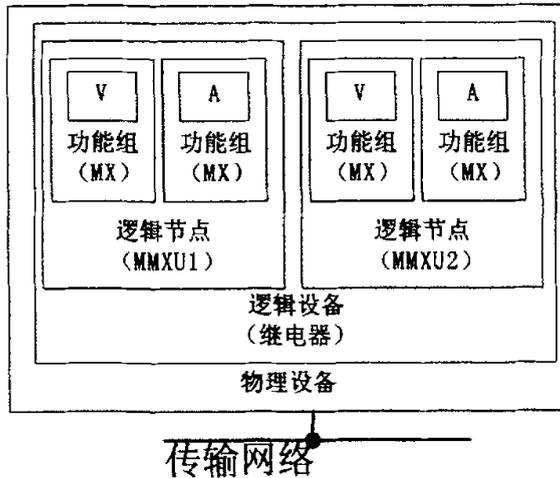


图 5-4 对象建模的实例

Fig. 5-4 A instance of UCA object modeling

图 5-4 中可以看出一个现实点设备的组成层次结构，采用面向对象的方法建模后，对一个点设备数据访问就可以通过一个参考路径来获取，如：  
Relay1/XCBR.PoS.CtlVal。

### 5.2.5 UCA 通用应用服务模型

UCA 通用应用服务模型 (Common Application Service Model, CASM) 提供数据访问、报表、登陆、控制应用和相关支持为通用通信功能集<sup>[99]</sup>。这套通用服务集充分考虑了：

- a) 各种服务和信息细节模型独立，

b) 高度的应用可操作性，及

c) 通过应用数据访问及建立通信通用机制来减少集成化及发展费用。CASM服务是抽象的概念，能够被映射到任何已有的通信协议应用标准。

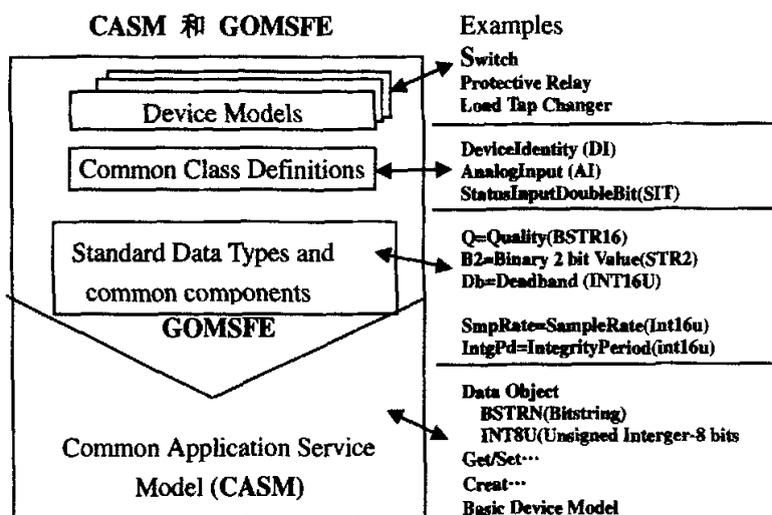


图 5-5 UCA 点设备层次关系图

Fig. 5-5 The hierarchy of UCA

MMS(ISO9506)是广泛应用于工业的一套精选的服务规范，UCA采用MMS，制定CASM映射到MMS的详细规范，但是CASM独立于MMS而定义。图5-5中描述看到，CASM直接为GOMSFE模型提供服务。

### 5.3 UCA 点设备模型的实现

对于变电站、电厂等网元系统中，直接访问并控制点设备显得非常重要。传统地，终端点设备是直接地连接访问RTU。RTU提供网络接口和处理初始访问数据进程。微处理器技术地发展导致了智能设备(IED)的发展，随着嵌入式网络技术的发展，直接导致了网络方式的访问设备，在同一个终端点设备可以运行更多进程。UCA文本中变电站和馈线设备通用对象模型(Generic Object Models for Substation and Feeder Equipment, GOMFGE)最为重要，是应用的基础。

设备模型在UCA应用通用一套服务描述了设备的通信行为。当和设备模型结合使用的时候，这些服务在UCA应用层协议(MMS)映射为完全规范详细的应用点设备结构互操作性。服务及MMS的映射在UCA通用应用服务模型(Common Application Service Models, CASM)中定义。CASM服务的应用对所有UCA设备模型是一体化变得简单。其他的优势是CASM允许独立于基本协议来规范设备模型。这些协议的独立激励了UCA活动组外面的参与者，将会简单

化迁移通过网关来连接已经存在较旧的协议。

点设备生产商也必须从产品规范（**Vendor Product Specification**）开始，来定义各种设备操作的功能。然后从 UCA 的应用标准设备模型中或 UCA 用户接口设备模型中选择合适的点设备模型来定义自己的点设备模型。设备生产商则基于自己的产品投资特点，从模型中选择自身市场适合的组件，并加入到他们产品的通信协议中，最终形成初步的产品模型（**Product Model**）。

产品模型定义了生产厂商通用应用服务模型的通信行为。通用应用服务模型文档描述了代表应用服务的机制，包括在各种基本的 UCA 应用层协议（如 MMS 等）。基于这个描述，生产商得出应用产品定义（**Application Definition**），它规范了应用层通信软件的需求并独立于底层协议层支持 UCA 兼容设备。最后投资商通过现有的通信网络条件（如：高速变电站 LAN，微波 WAN 等）选择合适的 UCA 通信剖面，再加上应用描述，最后得出最终的产品设计（**Product Design**）。

整个 UCA 点设备的形成过程如下图所示：

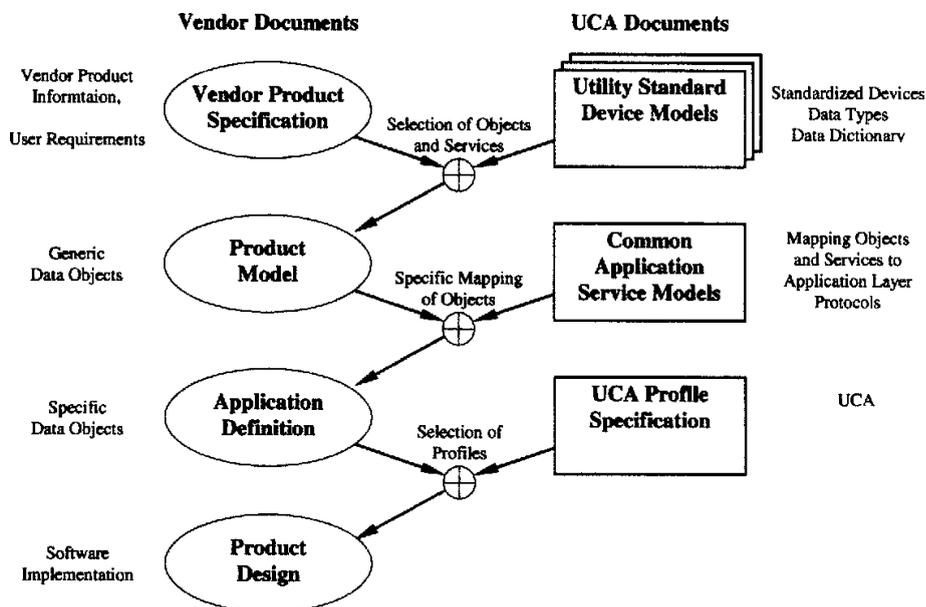


图 5-6 UCA 点设备定义

Fig. 5-6 Definition of UCA Field Device

从图 5-6 中可以看出一点非常重要，设备生产厂商必须保持 UCA 的三个完全不同的规范一致：

- 1) 合适的对象模型
- 2) 一种或多种通信剖面
- 3) 在对象模型中通用应用服务的合适的映射到应用层协议

### 5.3.1 UCA 技术及其点设备在变电站通信

到目前为止，国外和国内一些厂商都可以提供集成网元自动化系统（SAS），但是往往电力公司是不希望只依靠仅仅一家厂家来提供产品，就像 SAS 标准化为什么主要都是由用户需求来驱动的，从长远来看变电站自动化系统中各种点设备的互操作及其可替代性都是用户一直所追求的。UCA 的出现，使得各个厂家的点设备只要遵循 UCA 规范，它们之间的兼容性、互操作性将得到进一步的加强。

### 5.3.2 UCA 点设备模型

UCA 框架中有很多可能选择的应用、拓扑、和模型方法，图 5-7 中所示为 UCA 在变电站通信中的一个实际应用结构，本模型只是简单了显示了一般通信概念。

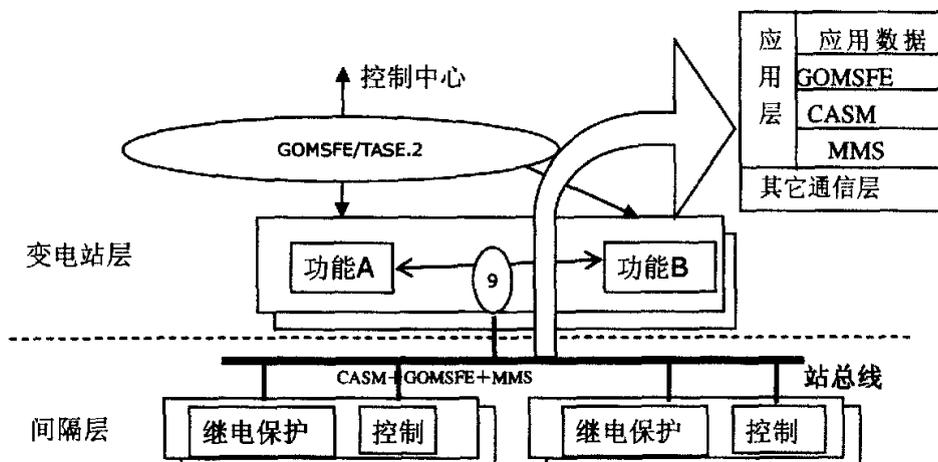


图 5-7 UCA在网元通信中的应用

Fig. 5-7 Application of UCA in power unit communication

对网元来讲，采用 UCA 中的 GOMSFE 和 CASM 模型，结合实际网络情况，应用 7/3 层 UCA 通信剖面，变电站可以提供控制及访问任何从 RTU 到本地计算机的任何信息，变电站 IED 到网络的接口由定义 GOMSFE 规范的 CASM 模型，与控制中心的模型采用 CASM（只是原始数据上传）服务。

网元及馈线网络通过柱上设备采集，经网络采集数据到控制中心，网络接口可以是网桥（链接不同的媒介）、微波中继、数据集中器（如 RTU）等。很多情况下，所有的应用层之间的通信都是基于 GOMSFE 模型，当控制中心直接同 IED 之间通信时，不需要任何接口单元。

各种结构可以提供不同的通信客户接口，比如包括仪表读取、电子账单、电能质量监控、损耗检测、远程链接/断开和边界管理需求等。UCA 客户端接口设备模型采用 CASM 服务，也能运行于 7/3 层各种媒质的通信剖面。

### 5.3.3 UCA 点设备应用过渡方案

为了保护现有投资，必须兼容历史预留的智能仪器。在实际应用中可以设计一个过渡方案，通过网关的形式来实现协议的兼容性。假设变电站采用私有的通信协议或者 IEC 60870-5-101/104 和-103 作为通信协议。

图 5-8 所示，传统的智能仪器必须用一个网关来实现私有通信协议到 UCA 的转换。网关必须具有以下几种功能：

- 1) 控制中心可以通过网关提供直接访问变电站传统点设备能力；
- 2) 在网关中，逻辑设备可以定义控制中心采集所需要的信息的数据集合；
- 3) 网关必须具有 GOOSE 报文通信能力；

4) 作为可选的一种方式，在网关中必须可以定义新的逻辑节点和数据类，网关提供变电站的控制中心的一个映像，对普通协议采用转换映射成 GOMSE 模型对各 IED 的访问。

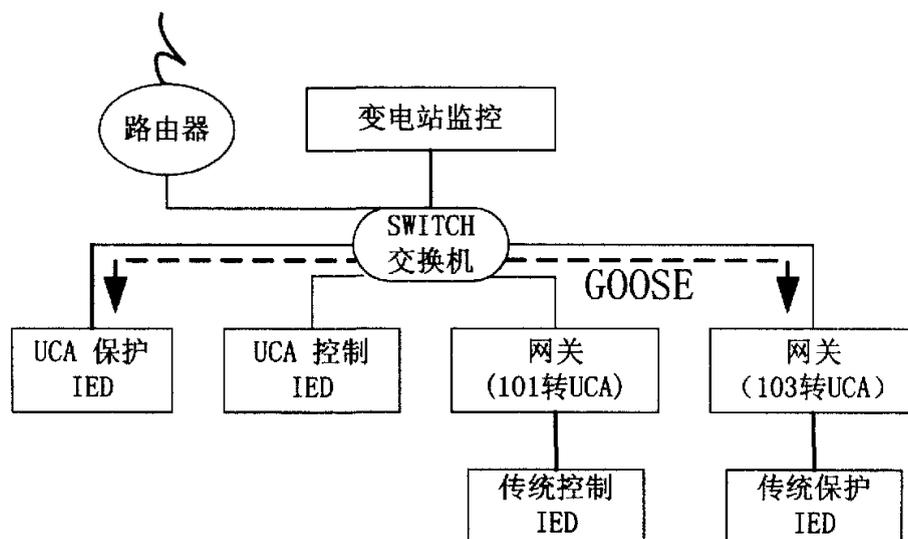


图 5-8 网元通信网关协议转换

Fig. 5-8 Gateway/proxy for protocol transformer of units

在网关提供网元控制中心的每一个映像中定义新的逻辑节点和数据类，如图 5-9 所示。

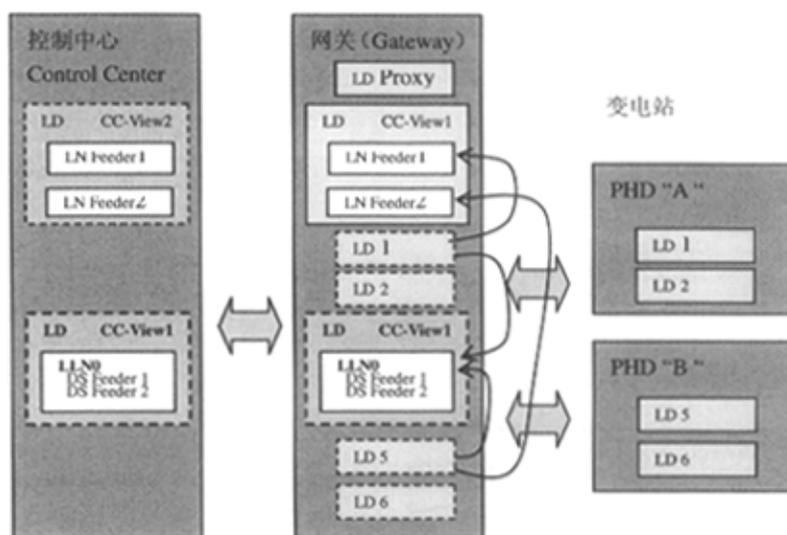


图 5-9 网元通信网关协议映像

Fig. 5-9 Gateway/proxy for protocol mapping in substation

对应用广泛的 IEC 60870-5 通信协议来看，网关要实现以下的各种映射关系：

- ✓ 映射 IEC 60870-5-101 服务到 UCA 中的通用应用服务模型 CASM
- ✓ 映射 IEC 60870-5-101 中定义的 ASDU 元素到 GOMSFE 中的通用数据类和标准数据类型和通用组件的通用数据类
- ✓ 映射 IEC 60870-5 定义的数据通过 UCA/GOMSFE 中的设备模型。

## 5.4 UCA 网元通信的集成

UCA 在电力系统的网元级综合应用见图 5-10 所示，图中描述了一个要集成的应用类型和网络拓扑的形式。

图中在公司 LAN 和控制中心用路由器实行安全措施进行广域网连接。UCA 提供应用层封装和在通过不安全网络时的安全措施。UCA 7 层通信剖面 (OSI/TCP/IP) 在这些连接中被应用。

变电站网元则可以联合 LAN 网络，使用 7/3 层 UCA 剖面。图中被变电站主机可以是任何从 RTU 到本地计算机的数据，它提供了第一层的控制机制。它与控制中心的通信可以采用第 4 章中讲到的基于 UCA 的运动通信一致模型。

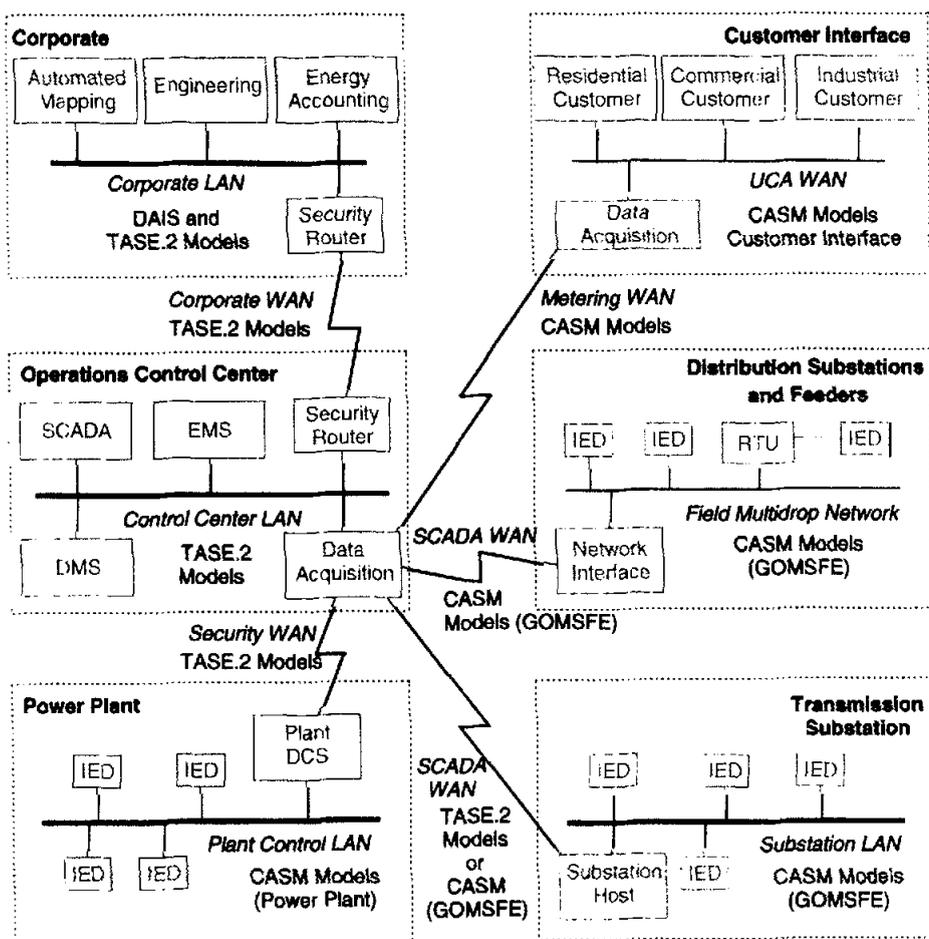


图 5-10 UCA 网元综合通信网络应用图

Fig. 5-10 UCA Integrated Network

UCA 客户接口设备模型采用 CASM 服务，也能运行于 7/3 层各种媒质的通信层面。

### 5.5 本章小节

UCA 采用了面向对象建模等技术，发展前景很好，已经被 IEC-61850 国际标准采纳。然而一个新的体系的推广需要一个漫长的过渡时期。目前国内有很多专家都参与 IEC 通信标准的工作，但是技术人员及设计人员对 UCA、IEC 61850 等技术还是很陌生。

本章根据国内外研究现状，重点做了以下几点工作：

- ✓ 采用 XML 语言对变电站技术建模型，分析了 UCA 点设备模型建模过程，对设备供应商如何利用 UCA 的文档来实现变电站 UCA 点设备产品化提

出了建议。

- ✓ 从多个侧面分析UCA现场设备在今后的变电站应用中的通信模式、接口转换协议的过渡、关于UCA产品逐步替代当前站内各种通信协议的现场设备的方案。最后为今后变电站UCA的应用过渡做了理论基础，文中对UCA在变电站应用过程中各种数据结构类型的转换做了特点分析。
- ✓ 分析UCA在电力系统中的综合应用实例，实现了第2章电力系统网元模型的应用。

## 第六章 基于 Petri 网不变性变换的电力调度通信网络模型

### 6.1 引言

传统调度自动化系统是在调度部门内一个主站计算机系统通过远动装置 (RTU) 收集远方厂站的实测数据, 处理完成显示、报警、打印记录以及通过对远方 RTU 发送遥控、遥调命令来进行电力系统设备的调控, 从而为调度员提供科学、经济管理电网的发、供、用电平衡。

通常信息的采集是采用 RTU 的一发多收, 其传输的协议为远动协议 (如: CDT 循环式协议和 POLLING 问答式的  $\mu 4F$  和 CDC-8890 协议), 传输的容量较少。远动信息的传输通道大多采用高速微波数字 (或光纤) 通道传输低速的模拟信号, 而且数字微波信道模拟使用的资源浪费现象严重, 使大量的通道被占用, 造成话路紧缺及资源的浪费。

计算机技术, 尤其是计算机通信技术的高速发展, 逐渐影响并改变着电力系统调度自动化系统的传统模式, 各主站计算机系统间通过计算机通信网络实现数据的共享已成为各级调度自动化系统数据来源的重要渠道。电力调度自动化系统经过多年的发展和应用, 其功能逐渐朝高层次发展, 从 SCADA (数据采集和监视) 发展到 EMS (能量管理系统)。特别是 EMS 的实现, 对数据需求将有更崭新的概念, 如调度计划曲线和运行报表等数据的双向交换; 经济调度和电压管理的分层控制; 状态估计、安全分析等分级计算; 以及电力市场的实现都势必要求各级调度自动化系统间进行大量的数据交换和数据共享。面对这样繁杂的数据交换要求, 单靠以往调度自动化系统的转发的计算机通信方式是难于适应的。

随着 UCA 等国际标准的制定及网络可行性研究的发展, 在我国组建电力系统调度数据网络就显得必要和迫切。它是实现电网分层控制、信息逐级传送、就近分布处理的重要手段; 它主要用于传输电力调度实时数据、电量、继保管理等准实时数据、电力市场数据, 以及与电力调度有关的其它实时和非实时数据。

基于我国目前应用于远动、计量、保护等点设备的实时数据业务的调度数据网络应用还是试点阶段, 根据第四章 Petri 网对调度数据网传递实时数据的可行性理论模型, 本章首先采用 CPN Tools 建立电力数据调度网的仿真模型, 对调度数据网和传统通道的通信速度进行了仿真, 然后采用路由器组建了广州调度数据实验网, 并以广州调度数据网为例进行现场测试。CPN Tools 仿真结果与现场测试

结果相符，为我国建设调度数据网提供了理论和实践依据。

## 6.2 电力信息系统特点

### 6.2.1 电力系统信息化业务分类

电力工业打破垄断，逐渐向市场化迈进。电力工业的市场化运作需要建立完善的电力市场技术支持系统。根据我国近期开放发电侧电力市场的基本框架和运行规则，电力市场技术支持系统有电能量计量系统、交易管理系统、能量管理系统、结算系统、合同管理系统、即时信息系统、数据网络系统、发电报价系统等各种业务。

#### 6.2.2 基于通用业务分类

基于通用业务电力信息网数据分为如下几种：

**话音业务：**话音业务有应用于调度电话的调度话音，和用于行政办公的行政交换话音业务。

**数据业务：**包括实时监控数据和系统互联等数据，具体如下面描述。

实时监控数据通常包括厂站远动信息、故障录播数据、电能量计量数据等实时数据业务。

系统互联数据通常又包括 EMS/SCADA 系统间的实时调度数据、MIS 系统间管理信息、信息检索等业务。

数据业务还包括大容量文件如 FTP、高分辨率图像数据、宽带可视图文、email 等数据业务。

**视频业务：**包括会议电视、可视电话、远程视频监控、远程教育等。

#### 6.2.3 基于应用业务分类

**实时应用业务：**语音业务和视频业务。

**电力生产实时数据业务：**厂站远动信息、故障录波器数据、电能量计量数据、EMS/SCADA 系统间的实时调度数据、云图气象、雷电监测、水情监测、生产报表、燃料管理等与电力生产直接相关的数据和应用软件所需的准实时数据。

**非实时应用业务：**MIS 系统间的管理信息、办公自动化管理信息、公文管理公用信息查询、检索计划信息管理、基建信息管理、设计信息管理、科技信息管理、各类统计报表信息

### 6.2.4 基于支撑技术的业务分类

基于支撑技术的业务分类可用表下下表来描述

表 6-1: 基于支撑技术的业务分类表

Table 6-1: the classified services based supporting technology

	A 类	B 类	C 类	D 类
连接方式	面向连接			无连接
比特率	固定	可变		
端到端定时	需要		不需要	

话音和视频业务需面向连接, 实时且比特率恒定, 具有最高的业务质量等级, 该类业务属于 A 类业务;

电力调度所需的实时数据传输需面向连接, 周期为 2-5s, 实时且比特率可变, 要求具有较高的业务质量等级, 该类业务属于 B 类业务;

电量计费、电力市场报价、调度局 MIS 之间传送数据需面向连接, 周期为 5min-1h, 实时且比特率可变, 业务质量要求等级较调度所需的实时数据低, 也可划为 B 类业务;

生产和管理所需的批次数据和其他数据, 包括 MIS 系统上所传送的报表、文件等数据业务, 其网上交换具有突发性、分散性和交互性的特点, 网上用户互访的要求多、随机性强, 传输周期随机, 非实时且比特率可变, 业务质量等级较低。根据其面向连接与否, 可划分为 C 类或 D 类业务。

### 6.2.5 电力业务的特点

电力工业信息系统由电力信息网和运行于调度数据网上的各种应用组成。该信息系统不仅包括各种网络通信设备、计算机、网络隔离设备等硬件, 还包括防火墙、入侵检测、病毒扫描、网管系统以及运行于数据网络上的各种电力系统网络应用软件, 如电力市场运营系统、电网调度自动化系统、电力企业管理信息系统、变电站自动化系统等。

电力工业信息网有以下几种特点:

1. 数据网络以 IP 交换技术为核心, 采用与因特网类似的组网技术。根据电力系统的通道基础、应用特性、安全要求、服务需求、技术发展等方面综合考虑电力系统数据网络的技术体制, 提出了一套以 IP 交换技术为核心的综合解决方案。另外, 为了满足目前继电保护、安全自动装置和远动设备的要求, 数据网络在 SDH / PDH 上直接提供了若干 64kbit / s 的专用通道, 今后业务也将走 IP 网络的趋势, 而其他业务都是基于 IP 协议的。

2. 电力系统应用向开放、互连、标准化方向发展。由于电力系统在完成向用户可靠、经济供电的整个过程中需要经历发电、输电、变电、配电等若干环节，因此为各个环节服务的电力系统网络应用之间也需要密切配合。电力系统自动化程度的提高使得它们向开放、互连的方向发展，而标准化是开放、互连的必然结果。

3. 数据网络的信息流模型是一种大型纵横交错的网状模型。由于电网运行实行统一调度和分级管理，所以在上下级调度之间和同一级的各个部门之间都有信息流动，信息的共享和安全之间的矛盾非常突出。

4. 按照数据网络中流动的信息特性来划分，数据网络可划分为实时控制网络、生产管理网络和企业管理信息网络。根据国家对网络及信息安全问题的有关政策和法规，这 3 种网络之间应该进行隔离。

5. 数据网络主要为电力生产、管理、决策服务。待条件允许时，数据网络的部分资源也将对社会开放，成为电力公司新的经济增长点，但是对外业务不能影响核心业务的正常运转。

6. 有些网络应用是为实时业务服务的，如 SCADA 系统。这种应用要求具有很高的可靠性、较小的响应时延(甚至在 ms 级)等特殊要求。应用设计以最大化系统性能为目标，很少考虑信息安全方面的需求。应用低端常常采用单片机和实时操作系统实现，可用的计算机资源相对有限，因此现有的安全技术和安全产品不完全适合于这类应用。过去由于采用专用现场总线协议和当地管控，因此几乎不需要考虑信息安全方面的需求。但是，随着嵌入式以太技术和现场总线协议标准化的发展，这类应用在信息安全方面的特殊需求将会越来越突出。

## 6.3 电力系统安全区域的划分

电力信息网就是电力工业市场化的重要基础设施。根据上面分析电力系统的特点 3，如果数据网络被黑客攻击而瘫痪或者网上传输的敏感数据被窃取甚至篡改，都有可能影响电力系统的正常安全稳定运行。因此，电力工业的市场化改革大大地增强了电力系统对信息系统的依赖性。

### 6.3.1 电力系统业务分层

图 6-1 所示为在上面电力信息安全策略情况下电力通信业务剖面图，以光纤、SDH 和以太网(WDM)作为公共宽带平台(155Mbit/s-10Gbit/s)。对继电保护、安全自动装置、现有远动设备等生产控制类业务应用采用 SDH / PDH 上提供若干 64kbit / s 专用通道的安全策略；对于变电站管理信息和电力市场交易等系统可以

利用 TCP/IP 网络传送，它们之间实现逻辑上的隔离。SPInet 首先从物理上与 SPDnet 横向隔离（SDH 专用通道这里也看成物理层隔离），采用 SDH+IP 或 Ethernet+IP 交换技术组网，内部各种信息系统业务、管理系统业务宜采用 VPN、MPLS 逻辑隔离。

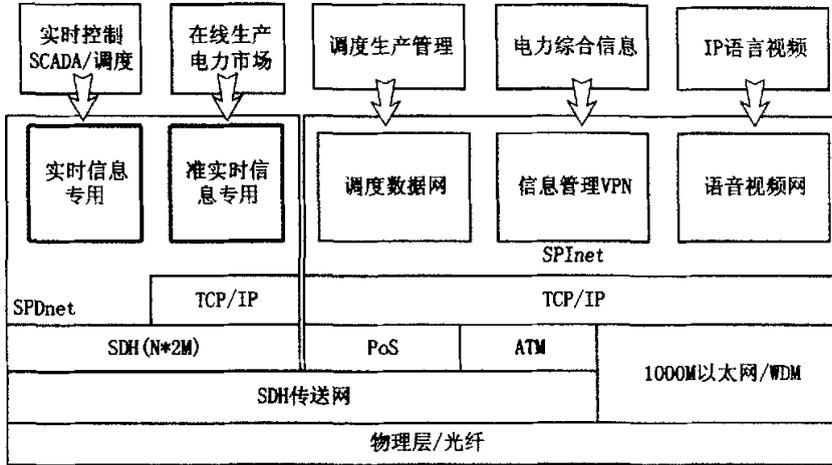


图 6-1 通信网络业务层次图

.Fig. 6-1 Telecommunication network services hierarchy

### 6.3.2 安全分区

从图 6-1 中可以看到，根据各种业务的网络安全及其对时延的要求不同，把电力数据通信网络应用分为调度数据网（SPDnet）和信息数据业务网（SPInet）。SPDnet 包括两大类：电网生产所需的实时控制信息区和准实时的生产区，具有实时监控功能的系统或者监控功能部分均应属于实时控制区，而非控制准实时数据生产区主要包括水调自动化系统、电能量计量系统、发电侧电力市场交易系统等原则上不具备控制功能的生产业务和批发交易业务系统。SPInet 也分为两大类业务：第一为生产管理用的非实时数据：如调度生产管理系统、雷电监测系统、气象信息接入、客户服务等；第二为信息网区，如财务管理信息系统（RMIS）、营销信息管理系统（FMIS）、物料资源管理系统、ERP、办公自动化系统（OA）等。各种业务之间分别实施不同的安全策略来保障电力信息安全。

总的来看，面向电力系统业务信息安全的策略概括起来有以下几点：

对业务的安全分区。电力二次系统划分两个大的电力调度数据网和信息网两个区，每个区又分别划分为电力数据网的生产区、实时控制区和电力信息网的管理区和信息系统区。对系统来说重点保护在数据区的 SCADA 系统和电力交易系统，如下图 6-2 所示。

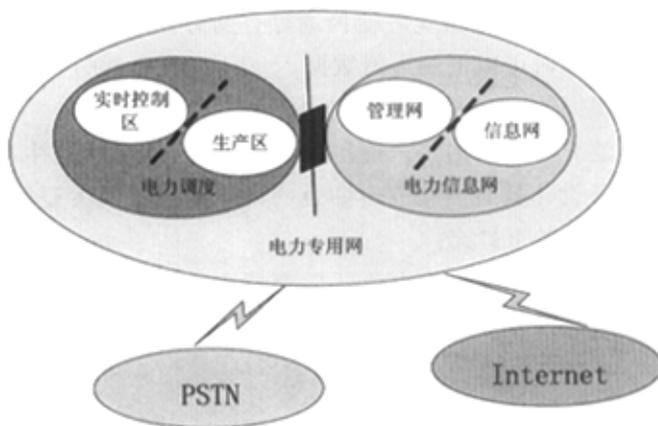


图 6-2 电力系统信息安全分区示意图

.Fig.6-2 Safely partition area of power information security

保证网络的专用。对两个网络 SPDnet 和 SPInet 实现物理隔离，即可以采用物理层的隔离。

横向对信息网和数据网隔离。在电力数据网 SPDnet 和 SPInet 中的业务可以采用逻辑隔离，如上面介绍的各种 VPN 等技术。

纵向认证。对各个数据安全区，在纵向边界部署认证加密装置，对 Internet 访问必须部署硬件防火墙。

因此调度数据网作为一个专用的网络将越来越被电力系统重视。

## 6.4 基于 CPN Tools 的调度数据网仿真模型

### 6.4.1 网络应用模式

根据上面论述，调度数据网应采用 ISO 的 OSI (Open System Interconnection) 体系，即 TCP/IP 方式组网。

因此，结合实际情况，电力调度数据网系统就必须达到以下的应用要求：

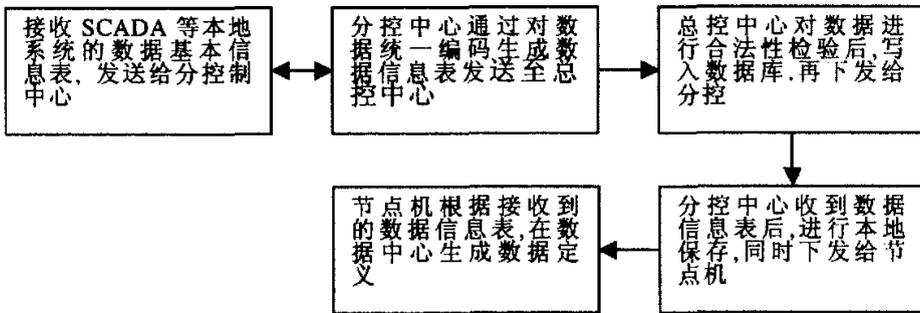
1. 提供各地 SCADA/EMS 系统间实时任务与实时任务数据交换；根据电网分级调度的原则，在实时数据网运行规则许可下共享各电网监控系统具有的不同地区和厂站的实时数据。要求实时数据为双向传输。通过通讯网关的模式，使用插件式协议模块，接入 104 等多种标准协议以及各种第三方接口。
2. 支持采用 RTU、UCA 等直接上网方式，依‘直调直采’的原则，使需要数据的主站能以网络的方式获得实时数据，从而使数据的更新速度较传统远动大大提高。

3. 对各地区之间的数据实时交换通过订阅方式进行控制，不仅可以选择上网数据，同时可以限制上网数据。
4. 纵向及横向的高扩展性；
5. 主系统建立和接入的生产应用系统相对隔离，不会产生相互制约的影响；
6. 通信网关设计具有网络安全防范的考虑；通信网关设计具备对不同协议的适应性，并可扩充；
7. 全网应用管理系统，有利于于管理员实时获得各种应用运行状态，监视通信链路数据内容和通信链路流量状态。

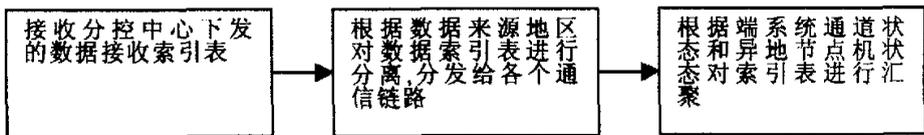
### 6.4.2 应用软件流程图

重要流程如下：

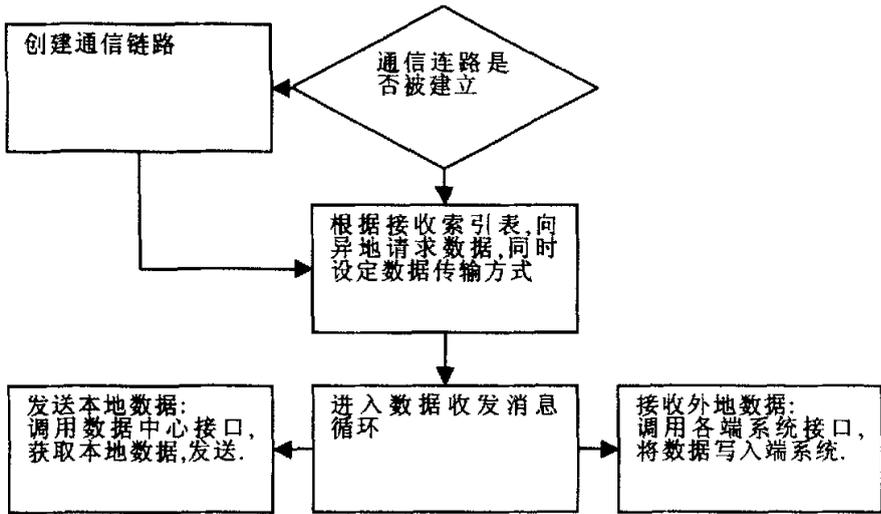
- 1、接收本地系统的数据原始信息表，发送给分控制中心；返回数据信息表，创建数据：



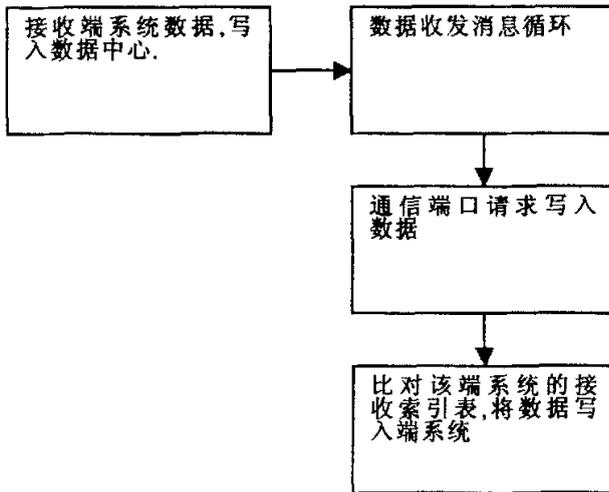
- 2、接收分控中心下发的索引表，经过汇聚生成本地索引表



- 3、通信端口实时数据处理



#### 4、端系统实时数据处理



### 6.4.3 基于 CPN Tools 的仿真模型

为了研究图 6-3 所示的网络层次结构，我们在 6.1 讨论的基础上，建立了调度数据网的仿真模型。该模型利用了 CPN 的嵌入变换的特点，在具体实现上，采用分层 CPN 的子页的概念，即把一个变迁扩展为一个 CPN，称为子页。原理如下：

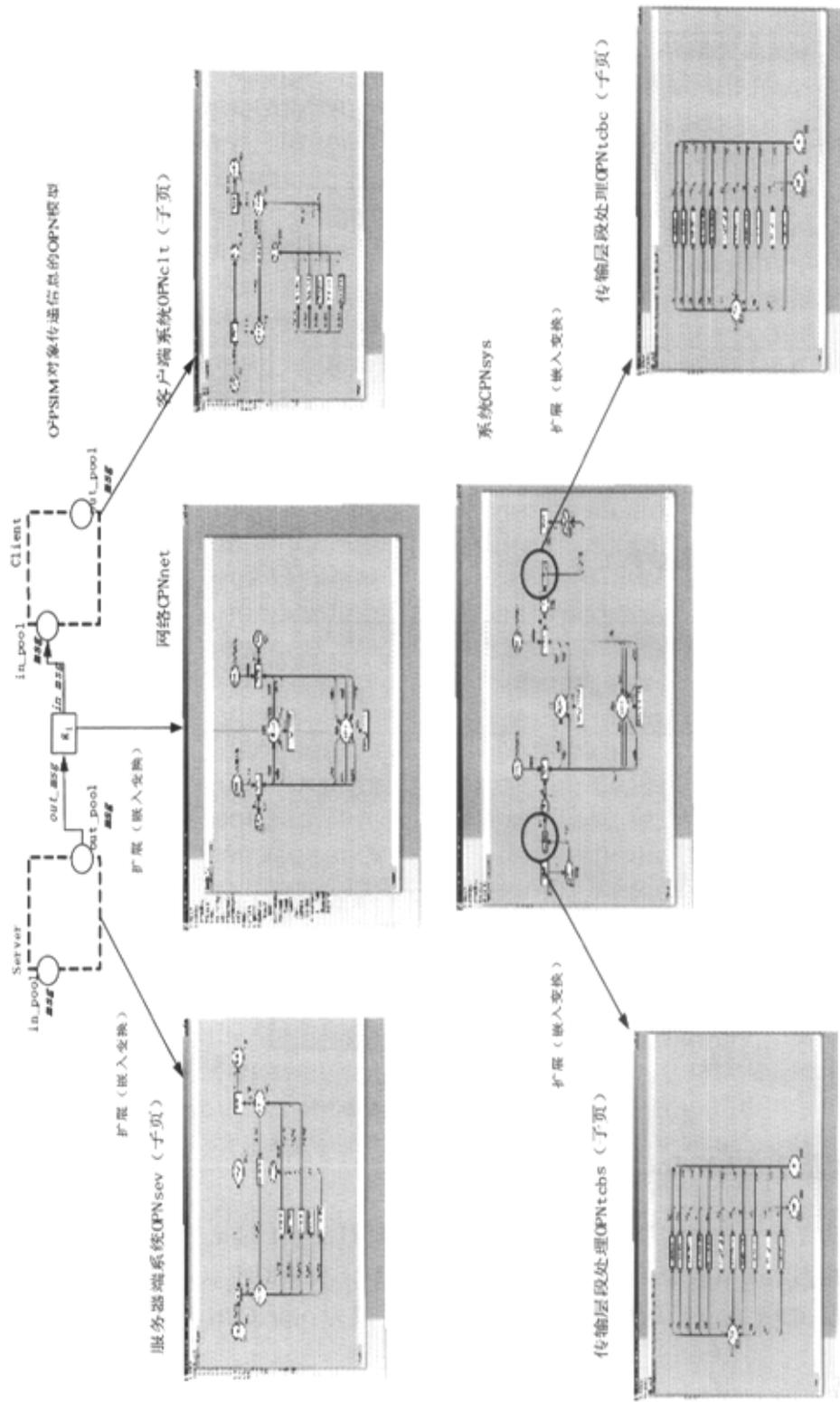


图 6-3 CPN Tools 仿真的层次结构  
Fig. 6-3 Hierarchy structure of simulation with CPN Tools

1. 整个系统采用第四章图4-14所示图 O<sup>2</sup>PSIM对象传递信息的OPN模型;
2. 传输网络是一个对称的CPNnet, CPNet如第四章图4-15所示, 其中位置 clt\_ser 测试客户端到服务器端进行读、写操作的丢包情况; 其中位置 clt\_ser 测试客户端到服务器端进行读、写操作的丢包情况;
3. 通过把gi扩展成CNPnet, 可得到网络的信息传输模型, 如第四章图4-16所示;
4. 服务器端和客户段采用OPN结构, 如第四章图4-13所示, 分别标为OPNser和OPNclt;
5. 通过分别把CPNnet中的变迁Server、Client扩展成OPNser、OPNclt. 可得到在应用层关于O<sup>2</sup>PSIM对象传递信息的模型, 该模型屏蔽了传输层以下的技术细节;
6. 通过分别把CPNnet中的变迁TCB1、TCB2扩充成如第四章图4-17所示的OPNtcbs、OPNtcbs, 可得到关于信息通过传输层的模型, 整个系统可进行传输层的仿真。

## 6.4.4 仿真及实验及结果分析

### 6.4.4.1 仿真和实验网络拓扑

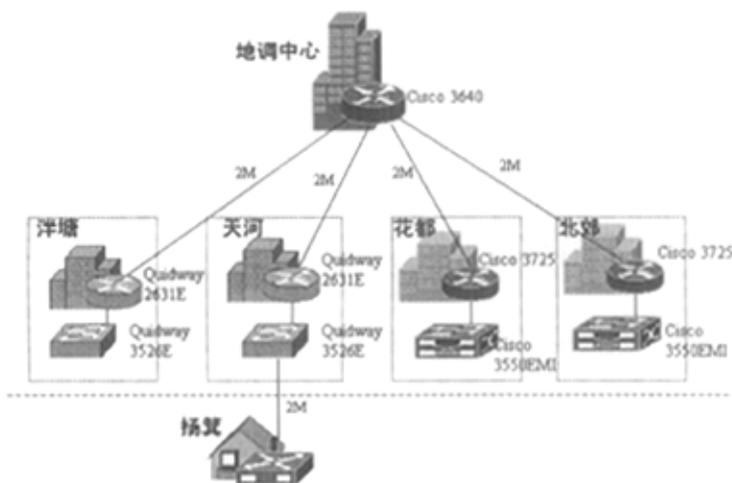


图 6-4 广州调度数据实验网总体拓扑

.Fig. 6-4 The topology of dispatch data network in Guangzhou power system

我们采用路由器组建了广州调度数据实验网, 其总体拓扑结构如图 6-4 所示。在网络设备方面, 虽然本次试点工程网络规模较小, 但为了兼容各种设备, 使用了思科和华为两家公司的产品, 总体的网络拓扑及设备使用情况如图 6-4 所示。

### 6.4.4.2 系统配置

主站端（地调中心）系统的配置见下图所示。整个系统包括主站通信服务分控服务、数据库服务器、中心控制服务器、网管工作站，通过 IP 认证加密装置。

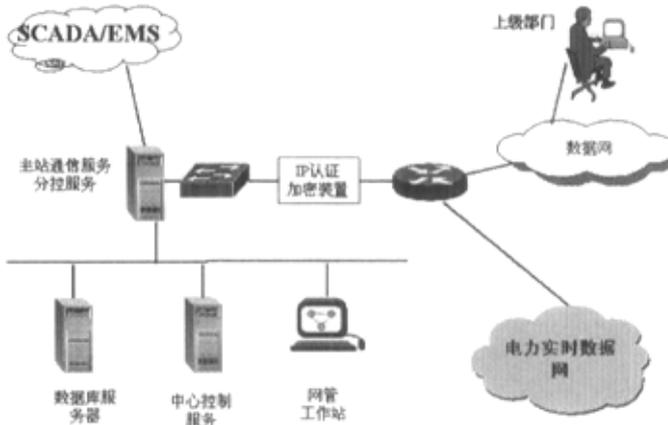


图 6-5 主站端系统配置图

.Fig. 6-5 Configuration of control center system

子站系统数据网关的接口方式见图 6-6 所示，配置 IP 认证加密装置，子站通信服务分控服务和电力实时数据网。

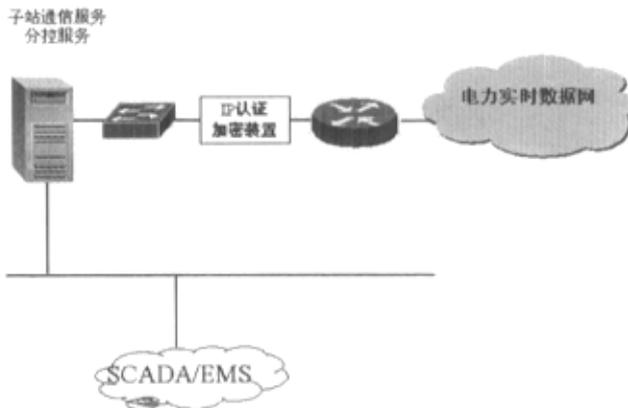


图 6-6 子站端系统配置图

.Fig. 6-6 Configuration of substation system

变电站综合自动化系统采用网络方式通过调度数据网接入主站，如图 6-7 所示。



图 6-7 电力数据网络通信方式

.Fig. 6-7 Communication mode of data network in Guangzhou Dnet

### 6.4.4.3 仿真与实验结果

本节用 CPN Tools 对调度数据网与传统通道的通信速度进行了仿真，并进行了现场测试。数据网与传统通道的配置如下：

数据网	传统通道
基于 TCP/IP 的网络通讯	基于传统通道的串行通信
通信带宽 100M	通信带宽 < 64K
实时数据变化传送	实时数据周期全数据传送
多进程、多线程收发	多进程、单线程收发

#### 1. 通过 CPN Tools 的性能仿真结果

仿真结果如下表和图 6.8(a)所示。

##### ● 主站

	测试内容	步骤数
1	协议模块发送实时数据到端系统	1180
2	通信平台发送数据到异地节点机	768

##### ● 天河变电站

	测试内容	步骤数
1	协议模块接收端系统实时数据	783
2	通信平台发送数据到异地节点机	.935

● 北郊变电站

	测试内容	步骤数
1	协议模块接收端系统实时数据	435
2	通信平台发送数据到异地节点机	862

● 洋塘变电站

	测试内容	步骤数
1	协议模块接收端系统实时数据	798
2	通信平台发送数据到异地节点机	869

2. 现场数据通信速度测试

现场数据通信速度测试结果如下表和图 6.8(b)所示。

● 主站

	测试内容	用时
1	协议模块发送实时数据到端系统	1.2 秒
2	通信平台发送数据到异地节点机	0.7 秒

● 天河变电站

	测试内容	用时
1	协议模块接收端系统实时数据	0.8 秒
2	通信平台发送数据到异地节点机	0.9 秒

● 北郊变电站

	测试内容	用时
1	协议模块接收端系统实时数据	0.5 秒
2	通信平台发送数据到异地节点机	0.8 秒

● 洋塘变电站

	测试内容	用时
1	协议模块接收端系统实时数据	0.8 秒
2	通信平台发送数据到异地节点机	0.9 秒

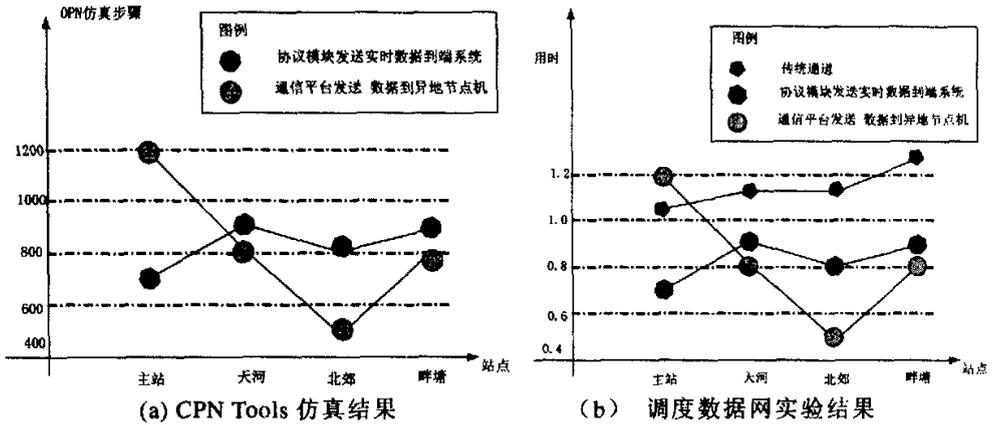


图 6-8 不同模式运动信息通信比较图

.Fig. 6-8 Tele-control information communication system in some different conditions

由图 6-8 可看出，调度数据网与原系统实时数据通信比较，数据网传输速度有了很大的提高。而且又满足了各个系统之间的安全性。

### 6.4.5 安全性分析

- 1) 网络在专用的通道 ( $N \times 2\text{Mbps}$ ) 上采用 MPLS VPN 技术组网，实现了各电力调度业务之间在跨越广域网时的安全防护，满足国家二次安防对调度数据网的要求。
- 2) 为地调继保信息系统及电量计费系统提供了纵向传输通道，在保证各电力业务之间安全性的同时，节约了宝贵的通道资源，大大节省了投资。
- 3) 使原有独立组建的网络纳入到一个统一组建的网络系统中，设备统一管理，网络结构清晰，大大减轻了维护人员的工作量。

### 6.5 本章小结

本章首先采用 CPN Tools 建立电力数据调度网的仿真模型，对调度数据网和传统通道的通信速度进行了仿真；采用路由器组建了广州调度数据实验网，并以广州调度数据网为例进行现场测试。从图 6-8 中可以看出，CPN Tools 仿真结果与现场测试结果相符，为今后建设调度数据网奠定了理论基础，并为我国建设调度数据网提供了实践依据。

电力数据网络建成之后，将为电力调度系统建设一个具有高性能、高可靠性、可管理的新一代数据网络，该网络将承载 SCADA/EMS 系统、电度量计费系统、保护故障信息系统以及 RTU 上网等，将实现广州电力调度数据更安全、可靠和实时的传送，以确保广州电网高效、安全、可靠、稳定、经济的运行。

## 结论

展望 21 世纪, 国内外电力系统出现电网互联和对外开放两大趋势。然而目前电力系统还不能实现无缝通信, 首要的问题是缺乏一个统一的规程、协议, 因此研究电力无缝通信结构将对今后电力系统网络维护和建设具有重要意义。

本文提出了基于调度层、网络层、网元层和点设备层的 4 层电力无缝通信结构, 并通过引入 Petri 网 (Petri Net), 提出了一种新的电力系统无缝通信网络模型; 提出了一种采用面向对象技术的电力系统信息模型 ( $O^2PSIM$ ), 并以组建的广州调度数据实验网为例, 采用 CPN Tools 进行了仿真, 仿真结果与现场测试结果相符, 为今后建设调度数据网奠定了理论基础和实践依据; 采用 UCA 面向对象方法建立统一网元模型, 分析了 UCA 现场通信设备在变电站的具体应用和详细的数据映射及过渡方案, 并提出了 UCA 数据通信模型在变电站现场通信设备的实现过程。

电力线通信已成为国内外电气工程、网络工程等领域的热点研究课题。本文分析了以往基于 OFDM 调制技术的 PLC 的不足, 结合 CDMA 技术提出了一种新的更加适合于电力系统环境下的电力线载波通信调制技术 (OFDM-CDMA)。从理论上证明了本方法能够获得更高的数据传输速率, 从而能提高电力系统通信效率。

本文在以下一些问题还有待进一步研究:

1. 进一步推广 PLC 接入技术, 研究更好的 PLC 调制算法将是我国电力市场进一步拓展的理论基础, 好的算法更能适合电力线的抗干扰性能。
2. 对电力无缝通信体系的研究。试验结果表明, OPN 是个对电力无缝通信进行建模的非常好的工具, 由于国内 OPN 应用于电力通信还不是很多, 因此今后有必要对 OPN 做进一步的研究。
3. UCA 模型虽好, 但是还没有达到广泛接受和应用的程度, 下一步工作将从理论上分析调度数据网对传输实时数据的可能性, 进一步推广 UCA 在电力通信的应用。

## 参考文献

- [1]. 陆延昌, 姜绍俊. 21 世纪初期中国电力工业展望. 中国电力, 2000, 33(7): 1-8.
- [2]. Mario Rabinowitz. Power systems of the future 1-4. IEEE Power Engineering Review 2000, 20(1, 3, 4, 8): 5-16, 20-29, 21-24, 4-9.
- [3]. Song Y. H. Electricity systems in China. Power Engineering Journal. 1996, 10(2): 60-63.
- [4]. 余良甫, 电力自动化系统现代通信技术研究, 哈尔滨工程大学硕士学位论文论文, 2003 年 1 月
- [5]. 王颖, 电力通信网综合网管系统研究与设计, 华北电力大学硕士学位论文论文, 2002 年 12
- [6]. 李洋洋, 电力自动化通信管理机制的研制, 西北工业大学硕士学位论文论文, 2003 年
- [7]. 谭文恕, 电力系统无缝通信系统体系, 电力自动化设备, 2001, 21(11):1-5
- [8]. 冯冲, 王翠茹. 统一建模语言 UML 的 MIS 应用. 中国电力, 2000, 33(8): 71-74.
- [9]. Smith H.L, Block W.R. RTUs slave for supervisory systems. IEEE Computer applications in power, 1993, 6(1): 27-32.
- [10]. Rutz W.L, Oatts M.L. Critical issues affecting power systems control center database Power systems, IEEE transaction on. 1996, 11(2): 923-928.
- [11]. Dorey H. Advanced metering in old and new network. Power Engineering Journal, 1996, 10(4): 146-149.
- [12]. 陈歆技, 单渊达, 吴杰, 基于 CAN 总线的新型馈线自动化系统, 电力系统自动化, 2000 年 10 月 10 日, 47-49.
- [13]. 周乐荣, 韦岗, 一种基于 UCA 体系的网络化远动通信结构, 电力系统自动化, 2004, 28(10):65-68.
- [14]. 谭文恕, 远动的无缝通信系统体系结构, 电网技术, 2001, 25(8):7-10.
- [15]. 赵祖康, 徐石明, 电力系统信息传输协议综述, 电力系统自动化, 2000, (25):65-71
- [16]. 余良甫, 王凤阳, 彭秀艳, 李永亮, 变电站通信体系 IEC61850 与 UCA2.0

- 对比分析, 电力系统自动化, 2003, 27(15):75-77.
- [17]. UCA Common application service (CASM) [s]. EPRI Standard, 1997.
- [18]. 周乐荣, 韦岗. UCA 分析及应用, 电力情报, 2002 年 4 月. 27-30.
- [19]. 张小伍, 涂荣疆, 王声琪, 新一代高速电力线载波通信技术, 新产口, 2000, (25): 62-63
- [20]. 何海波, 周拥华, 吴昕等, 低压电力线载波通信研究与应用现状, 继电器, 2001, 29(7):12-16
- [21]. 刘恒, 汪光森, 王乘, OFDM 扩频通信在电力线通信中的应用, 信息技术, 2003, 27(4):4-7
- [22]. 李瑞, 柯熙政, 电力载波扩频通信技术研究进展, 自动化综合技术, 2003: 91-93
- [23]. 吴昕, 周拥华, 张有兵等, 高速低压电力线载波通信中的正交频分复用技术, 继电器, 2001, 29(10):38-41
- [24]. Nicholson J. et al. RF impedance of power lines and line impedance stabilization networks in conducted interference measurements. IEEE trans. on Electromagnetic compatibility. 1973: p54-56.
- [25]. Tanaka M. High frequency noise power spectrum, impedance and transmission loss of power line in Japan on intrabuilding power line communications. IEEE trans consumer electronics. 1998, 34(2): p321-326.
- [26]. Zimmermann M. et al. A multipath signal propagation model for the power line channel in the high frequency range. Proc. of Int. Symp. on Power Line Commun. and its Appl. (ISPLC), Lancaster, UK, March 1999: p45 - 51.
- [27]. Bingham J. A. C. Multicarrier modulation for data transmission: "An idea whose time has come", IEEE Communications Magazine. May 1990, p5 - 14.
- [28]. Stancheva M. et al. Suitable MAC protocols for an OFDM based PLC Network, International Symposium on Power Line Communications (ISPLC), Month 2000.
- [29]. Ransica H. et al. Modelling MAC layer for powerline communication networks, International symposium on voice, video and data communications, November 2000.
- [30]. Burr A. G. et al. Application of OFDM to powerline

- telecommunications, 3rd International Symposium on Power-line Communications and its Applications. Lancaster. UK. 1999.
- [31]. Benyoucef D. et al. Spectral spreading by linear block codes for OFDM in powerline communications, 7th International OFDM-workshop 2002.
- [32]. Lampe H. J et al. Bandwidth efficient power line communications based on OFDM. archiv für elektronik und übertragungstechnik (International Journal of Electronics), (1), January 2000.
- [33]. Waldeck T. et al. Telecommunication applications over low voltage power distribution grid. IEEE Fifth Intern. Symposium on Spread Spectrum Techniques & Applications, ISSSTA ' 98.
- [34]. Leonard J. et al, Analysis and simulation of a digital mobile channel using orthogonal frequency division multiplexing, IEEE trans. on Commun., 33, 7, 1985: p665-675.
- [35]. Steffen P. et al. Theory of regular M-band wavelet bases, IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 41, No. 12, Dec. 1993: p3497~3511.
- [36]. David R. et al. Cosine-modulated FIR filter banks satisfying perfect reconstruction, IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 40, No. 4, Apr. 1992: p770~783.
- [37]. Nguyen T.Q. et al. The theory and design of arbitrary-length perfect reconstruction, IEEE Trans. on Signal Processing, Vol. 44, No. 3, Mar. 1996: p 473~483.
- [38]. Yee N. et al, 1993, Multicarrier CDMA in indoor wireless radio networks, Proc. Of IEEE PIMRC' 93, Sept. 1993: p109-113.
- [39]. 赵洪山等. 低压电力线扩频载波通信方案. 电力系统自动化, 2000, 24(12): 49-51.
- [40]. 钱学荣, 岳殿武, 张力军. 频率选择性衰落信道中多用户 OFDM 系统的自适应分配算法. 电子学报. 2002 年第 4 期.
- [41]. 方志民. 探讨电力企业管理信息系统的开发模型. 中国电力, 2000, 33(1): 82-85.
- [42]. IEEE Technical Report 1550 (1999): Utility Communication Architecture.
- [43]. Karlheinz Schwarz. IEEE UCA and IEC 61850 application in digital

- substations. Proceedings of the distribution techniques Europe 2000 conference, Vienna, 10-12 October 2000.
- [44]. 王业平等. EMS/DMS 一体化通信设计, 电力系统自动化, Vol. 23, No. 18, 1999.
- [45]. Slutsker I.W, etc. Real time recursive parameter estimation in energy management systems. Power systems, IEEE transaction on., 1996, 11(3): 1393-1399.
- [46]. Fardanesh B, Zelingher S, etc. Multi-functional synchronized measurement network. IEEE Computer applications in power, 1998, 11(1): 26-30.
- [47]. Rakic R, Micic A, etc. Acquiring reliable data for distribution control systems. IEEE Computer applications in power, 1996, 9(1): 44-47.
- [48]. Douglas L.D, Ghoshal K. Integrating third party packages into the EMS. IEEE Computer applications in power, 1995, 8(2): 20-24.
- [49]. 王海芳, 张其善. 基于正交频分复用 (OFDM) 的航空移动通信多普勒效应研究. 电子学报. 2003 年, 第 6 期: 812~815.
- [50]. 张小东, 徐平等. 基于复小波包的 OFDM 调制方法 (CWP-OFDM) 的研究. 电子学报. 2002 年, 第 4 期: 477~479.
- [51]. 王灿, 李乐民. 一种 OFDM-DS-CDMA 系统的性能分析. 通信学报. 1999 年, Vol. 20: 57~61.
- [52]. 曹叶文, 项海格. 多载波频率分集扩展频谱码分多址通信系统及性能分析. 电子学报. 1999 年, 第 4 期: 126~129 .
- [53]. 任雁铭, 操丰梅等, 基于嵌入式以太网的变电站自动化系统通信网络, 电力系统自动化, 2001 年 9 月 36-38.
- [54]. 沈杰, 李乃湖. 基于现场总线技术的变电站自动化系统. 电力系统自动化, 2000, 24(17):57-59.
- [55]. 何卫等. 变电站自动化分布式通信控制系统的设计, 电力系统自动化, Vol. 24, No. 16, 2000.
- [56]. Generic object models for substation and feeder equipment (GOMSFE) [s]. EPRI Standard, 1997.
- [57]. 张忠培, 赵亚红. 多用户自适应调制及功率分配. 电子学报. 2003 年, 第 2 期: 211~213.
- [58]. 黄晓, 陆建华, 郑君里. 低复杂度 OFDM 信号峰均功率比压缩技术. 电子学报. 2003 年第 3 期: 398~341.

- [59]. Petri Nets Tools Database Quick Overview [EB/OL].  
<http://www.daimi.au.dk/PetriNets/tools/quick.html>
- [60]. 陆以勤, Petri 网理论的研究及其在电信业务交互问题的应用, 华南理工大学博士论文, 1996。
- [61]. 袁崇义. PETRI 网. 东南大学出版社. 1989.
- [62]. <http://www.daimi.au.dk/CPnets/>
- [63]. <http://www.daimi.au.dk/PetriNets/standardisation/#overview>
- [64]. 陆维明, 林闯. Petri 网研究: 机遇与挑战. 计算机科学. 1994, 21(4): 1-4.
- [65]. K. Jensen, "Colored Petri nets", *Petri Nets: Central Models and Their Properties: Advances in Petri Nets 1986, Part I, Proceedings of an Advanced Course, Lecture Notes in Computer Science*, vol.254, Berlin: Springer-Verlag,, 1987, pp.248-299.
- [66]. Daniel M.H. ohere Petrinetze als Grundlage für Systemspezifikationen. Dissertation, University of Hamburg, Department for Computer Science, Vogt-Kolln Str. 30, 22527 Hamburg, Germany, August 1996.
- [67]. 姚轶, 邵军力. 利用 OFDM 技术在低压电力线上实现高速数据传输. 电力系统自动化. Vol. 25, No. 15, Aug. 2001:65-68.
- [68]. 冯秀清. 低压电力线通信及其实现. 辽宁工学院学报. Vol. 21, No. 6, Dec. 2001: 20-23.
- [69]. Yiqin Lu, Gang Wei. Solving liveness problem for marked nets by exhaustive coverability trees. *Progress in Nature Science*. 2001, p. 876-880.
- [70]. Yiqin Lu, Gang Wei. A temporal colored Petri nets model for feature integration in telecommunications systems. 华南理工大学学报. 2002 年, 第 30 卷: 26-33.
- [71]. Christensen S, Jørgensen J.B, and Kristensen L.M. Design/CPN A computer tool for coloured Petri nets. *Proceedings of TACAS' 97*, volume 1217 of *Lecture Notes in Computer Science*, 1997: 209-223.
- [72]. Jensen K. Coloured Petri nets. *Basic Concepts, Analysis Methods*

- and Practical Use, voll, Springer Press, Berlin. 1992.
- [73]. Lisa. W. Performance analysis using coloured Petri nets. PhD Dissertation. University of Aarhus. Danmark. 2002.
- [74]. 陆以勤, 韦岗, 欧阳景正. 基于着色 Petri 网的电信业务特性集成模型. 通信学报. 1999, Vol.20: 69-76.
- [75]. 陆以勤, 韦岗, 贺前华. 用着色 Petri 网不变量守恒变换检测和处理电信系统业务特性交互作用. 通信学报. 1999, Vol.20: 54-58.
- [76]. 周必水, 酃泓. 有色 Petri 网在通信协议中的应用. 系统仿真学报. 2003, Vol.15(增):112-114.
- [77]. 肖兵, 瞿坦, 王明哲. 网络延迟对列决策的影响. 计算机工程与应用. 2001. Vol, 21:9-11.
- [78]. 王玲玲, 曾建潮, 杨根科. 基于有色 Petri 网的多媒体流同步控制. 系统仿真学报. 2004, Vol, 16: 1222-1224.
- [79]. 周必水, 胡伟军. Petri 网可扩展性标记语言. 系统仿真学报. 2003 Vol.15(增刊): 49-52.
- [80]. 李兴伟, 黄建文. 计算机测控系统通信模型的建立与分析. 江苏理工大学学报. 1998 Vol.19: 40-45.
- [81]. 花全香, 邢汉承. Petri 网和图文法. 东南大学学报. 1994, Vol.24: 83-89.
- [82]. 曹阳, 张维明等. Petri 网在通信网络仿真建模中的应用. 计算机仿真. 2001. Vol.18: 38-41.
- [83]. 郝克刚, 王斌君. 非确定 Petri 网. 小型微型计算机系统. 2003, Vol.24: 582-584.
- [84]. 颜志军, 甘仞初. 基于 CPN 的信息系统资源配置动态模型的建立. 管理科学学报. 2002 Vol.5: 76-84.
- [85]. 倪小东, 李人厚, 郑庆华. 基于着色 Petri 网的协调策略建模研究. 西安交通大学学报. 2001, Vol.35: 1004-1007.
- [86]. 陆以勤, 韦岗. 电信系统的业务交互. 电信科学. 1996, Vol.12: 8-11.
- [87]. Yiqin Lu, Gang Wei, To-yat Cheung, "A use case driven approach to synthesis and analysis of flexible manufacturing systems", Proc. IEEE Intl. Conf. System, Man and Cybernetic, Tucson, Oct 2001.
- [88]. To-yat Cheung, Yiqin Lu, "Five Classes of Invariant-preserving Transformations on Colored Petri Nets", Lecture Notes in

- Computer Science. June 1999, Vol.1639, pp.384-403.
- [89]. Lee Y. K, Park S. J. OPnets: an object-oriented high-level Petri net model for real-time system modeling. Systems Software. 1993, Vol 20: 69-86.
- [90]. Wang L. The development of an object-oriented Petri net cell control model, Int.J Advanced Manufacturing Technology. 1996, Vol. 11: 59-69.
- [91]. Wang L. An integrated object-oriented Petri net paradigm for manufacturing control systems. Computer Integrated Manufacturing 1996.
- [92]. Wang L. Object-oriented Petri nets for modeling and analysis of automated manufacturing systems. Computer Integrated Manufacturing Systems, vol.26, 1996(2):111-125.
- [93]. To-yat Cheung, Lu YQ. Detecting and resolving the interaction between telephone features Terminating Call Screening and Call Forwarding by colored Petri nets", Proc. 1995 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, Vancouver, Canada, October 1995: 2245-2250.
- [94]. Allman M, Hayes. C, and Ostermann. S. An evaluation of TCP slow start modifications. Computer Communication Review. 1998, 28(3): 41-52.
- [95]. 杨小牛. 软件无线电原理与应用. 北京: 电子工业出版社, 2001
- [96]. R.R. M.Luise, Vitetta G.M. Blind equalization/detection for OFDM signals over frequency-selective channels. Areas in Communications, Vol.16, No.8, pp1568-1578, Oct. 1999.
- [97]. UCA Introduction. EPRI Standard, 1997.
- [98]. Generic object models for substation and feeder equipment (GOMSFE) [s]. EPRI Standard, 1997.
- [99]. UCA Common application service (CASM) [s]. EPRI Standard, 1997.
- [100]. UCA Communication Profiles, EPRI Standard, 1997.
- [101]. Committee Drafts IEC 61850-7-y: Communication Networks and Systems in Substations-Basic Communication Systems.
- [102]. IEC 60870-6-TASE.2: Telecontrol Application Service Element 2. 1996.
- [103]. 黄晓莉. 面向 21 世纪的国家电力数据网络 (上). 电力系统自动化,

- 1999, Vol. 23(12): 45-49.
- [104]. 黄晓莉. 面向 21 世纪的国家电力数据网络 (下). 电力系统自动化, 1999, .Vol. 23(13):45-49.
- [105]. 辛耀中, 等. 中国电力数据网络建设和运行中应注意的四个关系. 电力系统自动化. 1998, 22(1): 1-5.
- [106]. 元翔, 范方黎. 电力宽带数据通信网的设计方案. 电力系统自动化. 2000, Vol. 24.
- [107]. 陶晓农. 分散式变电站监控系统中的通信技术方案. 电力系统自动化. 1998, 22(4): 51-54.
- [108]. Humphreys S. Substation automation systems in review. IEEE Computer applications in power, 1998, 11(2): 24-30.
- [109]. 蔡洋 等. 新要求、新发展——面向 21 世纪的电网调度自动化. 电力系统自动化. 1998, 22(12): 1-4.
- [110]. 辛耀中. 新一代电网调度自动化系统. 电力系统自动化. 1999, 23(2): 1-4.
- [111]. Bann J. etc. Integration of artificial intelligent application in the EMS, issues and solutions power systems. IEEE transaction on. 1996, Vol. 11: 475-482.
- [112]. 余斌. 基于普通载波的信息远传和集成. 电力系统自动化. 1998, Vol. 12: 69-70.
- [113]. Dieterle W, Dittmar E. LAN-based data communication in modern energy management systems (EMS) Power systems, IEEE transaction on. 1996, Vol. 11(1): 469-474.
- [114]. Shau-Ming Lun, etc. LANSIM and its applications to distribution EMS Power systems. IEEE transaction on. 1996, Vol. 11(3): 1159-1165.
- [115]. Malinowski J.H, Balance J.W. The value of LAN/WAN based operational data display systems Power systems. IEEE transaction on. 1995, vol. 10(3): 1711-1715.
- [116]. Tom F, etc. Routing SCADA data through an enterprise WAN. IEEE computer applications in power, 1995, Vol. 8(3): 40-44.
- [117]. Claude S, Veronique C. Gateway systems integrates multi-server/ multi-client structure. IEEE Computer applications in power. 1995, 8(2): 10-14.
- [118]. Qiu B, Gooi H.B. Web-based SCADA display systems (WSDS) for

- access via internet. Power systems, IEEE transaction on. 2000, 15(2): 681-686.
- [119]. Rahimi A. F, Brandwajn V, Cauley G.. On external network model development. Power systems. IEEE transaction on. 1996, 11(2): 905-910.
- [120]. Singh N. etc. Power systems modeling and analysis in a mixed energy management and distribution management system. Power systems. IEEE transaction on. 1998, 13(3): 1143-1149.
- [121]. 张小平, 王伟. 面向对象的程序设计及其在 EMS 软件中的应用. 电力系统自动化. 1998, Vol. 22(5): 72-76.
- [122]. 范文涛, 薛禹胜, 慕志恒. 面向对象技术及其在电力系统中的应用. 电力系统自动化, 1998, 22(12): 72-76.
- [123]. 辛耀中. 电力系统数据通信协议体系. 电力系统自动化, 1999, 23(1): 40-44
- [124]. Smith H. L, Wayne R. B. RTUs slave for supervisory systems. IEEE Computer applications in power. 1993, 6(1): 27-32.
- [125]. Rutz W. L, etc. Critical issues affecting power systems control center database Power systems, IEEE transaction on. 1996, 11(2): 923-928.
- [126]. Howard D. Advanced metering in old and new network. Power Engineering Journal, 1996, 10(4): 146-149.
- [127]. Karlheinz Schwarz. Telecontrol Standard IEC 60870-6 TASE.2 Globally Adopted. <http://www.scc-online.de/uca/>.
- [128]. ISO/IEC 9506 : Manufacturing Messaging Specification, MMS, 1999.
- [129]. 任雁铭, 秦立军, 杨奇逊. IEC 61850 通信协议体系介绍和分析. 电力系统自动化, 2000, 24(8): 62-64.
- [130]. 陈鹏, 吕卫锋. IP 网络管理中的网络监视技术. 计算机工程与应用. 2001 年 16 期:41-44.
- [131]. 秦中玉, 童颖. 利用 SNMP 协议实现分布式应用程序的管理. 计算机工程. 2001 年 04 期:162-164.
- [132]. 黄俊飞, 廖建新. 基于 TMN 的电信网 IP 网络设备的管理. 现代电信科技. 2003 年 09 期:14-17.
- [133]. 苏军根, 余杨. 以太网物理拓扑发现的研究及实现. 现代计算机. 2003 年 10 期:65-68.

- [134]. 崔灿,常义林. 主动网络管理技术研究. 南京理工大学学报(自然科学版).2004年01期:85-89.
- [135]. 窦炳琳,朱有产等. 基于 Mobile Agent 的 SNMP 网络管理框架的研究. 华北电力大学学报.2004年03期.
- [136]. YaBo Li. Sen Su. Policy-based Softswitch System Management, The Journal of China Universities of Posts and Telecommunica,2004年02期
- [137]. UCA Communication Profiles, EPRI Standard,1997.
- [138]. P.Merlin: A Methodology for Design and Implementation of Communication Protocols. IEEE Transactions on Computers, vol.24, 6(1976).
- [139]. K. Jensen, Colored Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use, Volumes3. Springer Press, Berlin, 1997.

## 攻读博士期间发表的学术论文

序号	作者(全体作者,按顺序排列)	题目	发表或投稿刊物名称、级别	发表的卷期、年月、页码	相当于学位论文的哪一部分(章、节)	被索引收录情况
1	周乐荣, 韦岗	UCA 分析及应用	电力情报	2002年4月: 27-30	第五章	
2	周乐荣, 郭经红, 韦岗	基于小波变换的 OFDM-CDMA 高速电力线通信系统	华南理工大学学报	2004年, 32(11)	第三章	
3	Lerong Zhou (周乐荣), Jinghong Guo, Gang Wei	Wavelet-based OFDM-CDMA High Speed Power Line Communication Systems	Journal of Electronics (China)	2004年, 21(4): 332-336	第三章	
4	周乐荣, 韦岗	一种基于UCA体系的网络化远动通信结构	电力系统自动化	2004年, 28(10):65-79	第四章	
5	周乐荣, 伍力	综合智能控制技术在电网规划中的应用	广东电力	1999年, 12(3): 4-6	第一章	
6	周乐荣, 韦岗	UCA在变电站通信的分析与应用	电力系统自动化	录用	第五章	
7	伍力, 吴捷, 周乐荣	面向规划的广东电网数据库的建立及其应用	电力系统自动化	1999年, 23(13): 50-51	第一章	
8	周乐荣, 陆以勤, 韦岗	一种基于Petri网的电力调度通信模型	电子与信息学报	已投	第六章	
9	周乐荣, 陆以勤, 韦岗	一种基于Petri网的电力系统无缝通信模型	电路与系统学报	已投	第二章	

## 致 谢

本论文写到这里，意味着6年的博士求学生活即将结束。这里首先向韦岗教授表达我衷心的感谢。6年时间的在职求学生涯，韦岗教授为我指明了研究方向。由于工作的繁忙，每次只能在下班后在韦岗教授休息的时间向他请教，他谆谆教诲、悉心指导、从不厌倦的精神才使得我的博士论文能够如期完成。韦教授渊博的知识、敏锐的思维、严谨的治学态度、务实求真认真的科研精神、分析问题独到的见解以及诲人不倦的教学精神，给我留下了难以忘怀的印象，使我受益终生。攻读博士学位期间将成为我人生一段美好的回忆。

感谢陆以勤、陈芳炯、贺前华、季飞诸位老师，他们在学术上和生活上给予作者很多指导和帮助。

感谢我的好朋友夏文波博士，在博士论文完成期间，我们的友谊帮助我度过了学术上一次又一次的难关。

最后，要感谢为我的成长付出无数心血的父母以及一贯支持我的朋友们，特别要感谢的是我的妻子和儿子，在这里向他们献上我最深切的挚爱和最衷心的祝福。

感谢所有关心和支持我的朋友和亲人们！

周乐荣

2004-11-3