分类号_____ 公　开_____
U D C_____ 编　号_____

清　华　大　学

博　士　后　研　究　报　告

电能质量控制基础技术研究

袁仲达

清　华　大　学

2016年 10月

电能质量控制基础技术研究

Intelligent Control Theory and Application in Electronical Devices for Energy Networkings

博　士　后　姓　名 ：袁仲达

流动站（一级学科）名称 ：控制科学与工程

专　业（二级学科）名称 ：控制理论与控制工程

合　　作　　导　　师 ：曹军威（研究员）

研究起止日期　2014年10月——2016年9月

摘 要

电能质量控制是一个复杂的系统工程，通过电力电子以及自动控制等多种技术的融合，向用户提供恒定平稳的电源供给。20世纪80年代以来，随着社会和科技的发展，用电量不断上升的同时，各种复杂的、精密的、对电能质量敏感的用电设备不断普及，用户对电能质量的需求也越来越严格。电能质量的优劣已经会直接影响社会生产、生活的各个方面。提供和维护高品质的电力能源，是电力部门的责任，也是全社会共同追求的目标。在这种时代背景之下，电能质量控制相关的技术，已经成为研究的热点。

目前，学术界和工业界对电能质量的定义并不完全相同，但是概括起来电能质量主要包括电压质量、频率质量和供电可靠性三个共同的方面。改善电能质量的装置和措施很多，发展到现在以大功率电力电子器件为核心单元的新型装置可以用来有效地抑制或抵消电力系统中出现的各种短时、瞬时扰动，而常规措施则很好地适用于稳态电压调整。电能质量控制装置按功能可分为以下三大类:无功补偿装置、滤波器和着重于解决暂态电能质量问题的统一电能质量调节器(UPQC)。为了电能质量控制装置充分发挥其设计功能，采用准确、高效的分析与控制方法是至关重要的。首先要获得及时、准确的有关“源”信息，如三相电压、三相电流、中线电流及中线对地电压等，然后对这些源信息进行实时、快速的分析，得到所需的控制信息，控制装置根据这些控制信息，采用适当的控制方法产生相应的动作，最终才能得到理想的补偿效果。

控制方法与电能质量问题类型以及控制装置密切关联并形成体系。传统的一些用于稳态电压调整的装置，如并联电容器、并联电抗器、变压器分接头等机械式装置和控制技术，对电能质量问题反应速度慢、控制不精确、调节能力有限。现代自动化控制技术在电能质量控制领域的应用，产生了基础的闭环控制，以及采用模糊控制、智能控制等现代控制策略的控制技术和控制装置。大功率从电力电子技术的发展，推出了基于电力电子技术、通过变流器与电力系统相连接的电能质量控制装置和控制技术，例如SVG(静止无功发生器)、APF(有源电力滤波器)、DVR(动态电压恢复器)、DSTATCOM(即并联型DVR)、以及UPQC等多种控制方法。功率输出器件中变流器PWM控制技术已经发展为目前最常用的控制方法，通过调节导通角和调制脉宽可以控制能量存储装置与电网间的有功或无功交换，进而有效地抑制交流侧的谐波。

电能质量控的核心控制器目前一般采用DSP+FPGA构架完成体系结构，信息

处理能力的增强使得电网信号检测分析以及控制技术越来越具备快速、高效以及高度智能化等特点。与信息技术和互联网技术的充分融合，更使得电能质量控制装置具有远程操作远程监控等必备的功能特性，与之相关的远程控制、自主控制以及远程监控技术的研究发展，使得电能质量控制逐渐向网络化发展。

本文定位于电能质量控制基础技术，在以下几个方面展开了研究。

电能质量信号的监测过程同时具有连续性和实时性两个需求，一方面电能质量的信号需要连续处理，另一方面信号发生畸变质量事件发生的时候需要及时完成检测。以往的利用小波变换的模极大值奇异性进行检测的研究中，直接利用传统的小波分析方法对连续的信号中的窗口数据进行处理，具有计算效率低下的缺点。文中提出的针对电能质量连续监测的增量式小波分析方法充分利用了小波变换律和结合律特性，针对连续信号处理时历史数据的贡献，增量式的完成电能质量信号的连续监测。

电能质量控制器的智能化和分布式的部署需求之下，对控制装置进行远程的控制和调试就成为一个必须解决的问题。文中利用网络传输，与植入到软件中的调试模块建立数据通信，完成交互式的在线调试操作。植入的调试监控模块需要通信能力与上位机的调试终端建立网络连接。调试功能模块需要在DSP系统的后台运行，能够响应与上位机的网络通信协议完成数据的交互。并且，控制DSP芯片前台目标程序，即待调试程序的运行和中断，读取和设置指定内存空间的数据内容，完成IO端口的读取写入，程序运行过程中堆栈空间的解析已完成函数调用层级关系的解析和可读性显示。上位机调试工具需要完成网络通信协议的解析，需要完成目标程序的调试信息提取，变量和运行地址的映射关系管理，以及堆栈空间内容的解析和文本显示。

与此同时，由于电能质量控制装置的工作性质是提供稳定可靠的能源交换，实际工作场景中一旦出现需要解决的故障时，必须在非常快的时间内完成控制动作，这就要求电能质量控制装置具备高度智能化程度，能够自适应的完成高效率的信号检测，信息处理以及自我防护能力。针对这些需求，文中利用FPGA计算技术所独有的高效率和高可靠性，分别提出了基于FPGA计算的程序自我保护技术，以及基于FPGA计算的可以动态编程信号检测以及信息处理技术。

电力系统的智能控制中，需要对离散采集得到的电力信号做出数字分析才能够用于后续的智能控制策略。以往的系统中大多通过软件方法在控制器的计算核心完成数字分析，随着智能控制的信号来源数量增加，计算量的压力会随之增加，对控制装置的器件选型系统设计和成本控制带来巨大的压力。本文利用FPGA计算的大规模并行处理能力，将电力信号的分析算法进行改进，并且转移到采样模

块并通过FPGA硬件完成计算。仿真和实验结果表明，采用FPGA计算可以提高信号处理的效率，降低控制核心的性能需求。

电能质量控制装置的工作场景复杂多边，相对应的针对电能质量控制装置的测试环境和测试技术就必须高效率高复现度的完成各种场景的模拟，才能够保证电能质量控制装置部署以后的有效可靠的工作。针对这一问题，文中将介绍一种电力电子技术实现的测试环境构建技术，模拟电能质量控制装置所需要面临的工作场景。新的构建技术提出了能量回收的概念，通过电力电子的控制技术使得电力信号波动场景模拟过程中所需要的能量消耗大幅度的降低。

本文的主要工作内容可以归纳为如下几个方面：

- 改进模块化电能质量控制器构架设计；
- 改善电能质量控制器的远程调试以及远程软件升级技术；
- 利用FPGA计算的可编程特性，完成电能质量控制器远程自主的保护以及可编程的信号检测；
- 利用FPGA计算的高效特性，完成电能质量控制器嵌入式计算系统中高效率完成电力信号的检测分析以及预处理；
- 完成嵌入式环境下自主的软件平台技术；
- 利用改进的小波分析技术，提高电能质量控制器对电网信号的分析效率；
- 改进电能质量控制器远程监控技术；
- 电能质量控制器控制器测试技术，改进测试环境和测试方法的能源损耗。

总而言之，本文围绕电能质量控制装置相关的理论设计，控制实现、性能改进提升以及最后的测试验证展开了多方面的研究，为电能质量控制技术的提供了新的方法。

关键词：电能质量控制，嵌入式系统，信号分析，FPGA计算，远程自主控制

Abstract

Power quality control system is a complex projection, which utilized electronics, electric power technologies, and automatic controls to maintain the stability and sustainability to end users of power system. After the 80's in last centuary, there is a global trend of increase of eletric power consumption. Complex, complicated and power sensitive devices are more and more common, as a result more attention has been paied to the quality of power supply. The quality of power supply is exerting more and more influence not only to enterprises, but also to our daily life. The production of high quality power supply if of greate importance for both power supplier and power sonsumer. As a result of these requests, power quality related topics become a hotspot of research.

Although the precise defination of power qulity varies in academic realm and industrial realm, mainstream accepted conception about power qulity consists of three different components: voltage stability, frequency stability and reliability. Many measures and devices to guarantee power quality are introduced in the last decades, within them power electronic devices based equpments has became the mainstream. Short time vibration in voltage and current can be handled effectively by power quality controllers. According to the main purpose, power quality controllers can be divided into three classis: static VAR compensator, active power filter, and universal power quality controller. As a foundation of power controller, accurate measurements, efficient signal analysis and real-time controll tecnique are very inportant. Measurements in power controller covers instantanious voltage, current and frequency. Analysis stage deducts statistical indexis like effective value of voltage, effective value of current, and so on. Based on the extracted information of power system, realtime drives AC inverters to accomplish power supply stability in user side.

In the power controller, methodology of compensation is connected with type of power quality events, and devices to acomplish compensation. Classical devices, such as shunt capacitor, shunt reactor, or adjustable transformer suffers slow reaction speed, low accuracy in target control and limited regulating capacity. Modern advances in automatica control theory and electric power devices promoted the development of fuzzy controller and intelligent controller in power quality regulators. Tecniques like SVG, APF, DVR, DSTATCOM and UPQC arise in the last decades and are widely applied in various

circumstances. Inverters that based on PWM modulation has become the mainstream approach in energy output. Active or reactive energy exchange is modulated between power network and energy storage devices to compensate the vibrations and suppress high frerquency harmonics.

Mainstream archetecture of power controller is a cobination of DSP and FPGA, within which DSP handles logical calculations like status transitions, FPGA handles digital and analogy signal preprocession. This kind of hybrid combination, fast signal process and efficient computation enriched the intelligency scale of power controller. Information technique has played a more and more important role in controllers, as a result remote control and off-site monitoring becomes widely used in powet controllers. Advances in information technology opened a new terrotory of power controllers, and promoted the internetowrking of power producer and consumers.

In this paper, research is carried out in following sectors.

In power controller, signal processing must be continous and instantanous. Power system monitoring shall not be interrupted, and any distortion shall be detected and compensated with microseconds. Existing distortion detection techniques that uses wavelet analysis to find maximum modulus value is computational inefficient. In this paper, a continous wavelet analysis algorithm with sliding window is proposed to improve the efficiency. By exploiting the commutative law and associative law of wavelet analysis, proposed algorithm can deduce the new result from old result in a linear complecity of computation to the widow size, which is much faster than full analysis on the sample window.

When power controller is deployed, remote control becomes a important factor, because the device is not always suitable for operators to carryout manual control. In this paper, communication over ether net based architecture is proposed to implement remote control and remote debug. With a debug module implanted to software that runs at DSP, upper stream workstations can send down remote control command and debug instrumentation to the controller, gather result of execution of these commands, render and interact with end user that operate at remote control terminal. Debug module that inplanted can handle various commands, which includes pause, resume execution flow, read write memories spaces, access to IO ports, and analysis the stack to reveal the context of execution.

Safety and reliability on power controller is always at priority number one. Abnor-

mality in power controller is of high dangerous both to controller itself and the power system that contains the device. Fault torlerance in this paper is implemented by aotunomous abnomality handler insides FPGA. At the time exceptions happends in the controller, periperal devices outside DSP can react indendantly to put the controller into a safe state, and isolate the influences to the minumum range.

Besides analogy signals processing capability, FPGA computation is much more adept at digital signal processing. Communications and state monitoring of external equepments is handled by FPGA logic in this paper. Relieving the DSP from this kind of computation not only improves the response speed, but also enabled the possibility to deploy more complicated trategies that must be deployed in the logic control kernel of DSP.

Testing of power controller is the final stage of development of power controller, which is the last line to gurantee the quality of power controller. Existing testing techniques that that based on passive devices such as resistor, capasitor and transistors to simulate the power grid has a very high ennergy consumption level. In this paper, electric deviced based simulator and tester is promposed to mimicry vibrations and hormanics in power system. Energy recycling in the output side of power controller is the key to reduce power consumption.

Advances in this paper can be summarised as following:

- Improvement on archetecture design of power quality controller;
- Remote control and remote debug technique of poer quality controller;
- Autonamous protection and programable signal processing over FPGA;
- High efficiency and high performance analoge signal procesing over FPGA;
- Sofeware technology over imbedded system for power controller;
- Continous progressive wavelet analysis on power system parameters;
- Advanced SCADA system of poewr controller;
- Energy efficient testing device and testing technique of power controller.

In conclusion, this paper studied the archetecture of power system regulator, implementation and optimization. With FPGA computing technique applied int power regulaters, efficiency and performance have been improved.

Key words: Power Quality Control; Embedded System; Signal processing; FPGA computation; Automated Remote Control

目 录

第1章 前言 1
1.1 电能质量控制器的模块化设计 2
1.2 电网信号的实时检测技术 3
1.3 电能质量控制系统中的高速网络通信需求 5
1.4 智能控制装置的远程控制 6
1.5 智能控制装置的自主控制 7
1.6 电能质量控制器嵌入式实时控制软件技术 8
1.7 智能电力控制装置的测试与认证 9
1.8 总结 10
第2章 电能质量控制装置中的智能控制器和智能控制系统 12
2.1 序言 12
2.2 智能控制器系统构架的硬件部分 13
2.3 智能控制器系统构架的软件部分 15
2.4 智能控制器远程访问的网络协议 16
2.4.1 监控功能模块网络协议 19
2.4.2 调试功能模块网络协议 21
2.5 智能控制器远程监控子系统 21
2.5.1 状态数据上报 21
2.5.2 告警数据上报 22
2.5.3 录播数据上报 22
2.5.4 远程控制 22
2.6 智能控制器远程调试子系统 23
2.6.1 命令格式 23
2.6.2 文字编码 23
2.6.3 网络传输协议 23
2.6.4 网络调试终端的指令集 24
2.7 总结 26
第3章 高效率信号分析技术和电网信号检测 32
3.1 前言 32
3.2 电能质量信号检测问题和传统的小波分析检测方法 33

3.3 增量式小波分析方法的算法原理 34
3.4 增量式小波分析方法的设计实现 34
3.5 增量式小波分析方法的性能分析 35
3.6 仿真实验和结果分析 36
3.7 结论和展望 37
第4章 能源互联网中基于FPGA的远程自主控制技术 38
4.1 序言 38
4.2 FPGA计算技术实现分布式程序死锁保护 39
4.2.1 FPGA上部署的独立于DSP的运行保护逻辑 40
4.2.2 分布式运行死锁保护技术原理 40
4.2.3 分布式运行死锁保护的实现 41
4.2.4 硬件电路完成程序死锁保护技术的实际应用 42
4.3 基于FPGA计算的可动态编程信号检测技术 43
4.3.1 基于FPGA完成逻辑信号处理 43
4.3.2 可动态编程信号检测原理 43
4.3.3 可动态编程信号检测技术实现 44
4.3.4 实际应用以及效果分析 47
4.4 总结 47
第5章 电能质量控制器中基于FPGA的前端模拟数据处理 48
5.1 序言 48
5.2 电力信号有效值计算方法问题在嵌入式控制系统中实时处理 50
5.2.1 利用FPGA实现大规模并行计算电力信号有效值 51
5.2.2 实验结果和结果分析 54
5.3 基于FPGA计算的模拟采样直流偏置自适应校准 55
5.3.1 自适应校准问题 56
5.3.2 控制器体系结构 56
5.4 结论和展望 60
第6章 能源互联网中远程控制远程调试技术 61
6.1 前言 61
6.2 采用以太网络传输的嵌入式系统远程调试技术 62
6.2.1 远程控制远程调试问题 62
6.2.2 基于以太网络传输的嵌入式系统远程调试 63
6.2.3 基于以太网络传输的远程调试系统实现方法 64

6.2.4 技术应用和结果分析 65
6.3 基于网络传输和反向部署的DSP控制系统软件升级方法 66
6.3.1 远程控制软件升级问题背景 67
6.3.2 远程控制软件升级原理 69
6.3.3 远程控制软件升级技术实现 69
6.3.4 技术应用以及结果分析 71
6.4 总结和展望 71
第7章 能源互联网中整体测试装置 72
7.1 前言 72
7.2 电能回馈型电压跌落发生 73
7.3 电能回馈型电压跌落模拟原理 74
7.4 实现方案 76
7.5 实验结果以及分析 77
7.6 总结和展望 77
第8章 总结和展望 78
8.1 总结 78
8.2 展望 79
参考文献 80
致 谢 82
个人简历、发表的学术论文与科研成果 83

主要符号对照表

DSP	数字信号处理器高性能计算(Digital Signal Processor)
FPGA	现场可编程阵列(Field Programable Gate Array)
UPQC	统一电能质量控制器(Universal Power Quality Controller)
SVG	静止无功发生器(Static Var Generator)
APF	有源电力滤波器(Active Power Filter)
DVR	动态电压补偿装置(Dynamic Voltage Regulator)
DSTATCOM	配电静止同步补偿器(Distribution Static Synchronous Compensator)

第1章　前言

能源互联网作为一个正式的未来能源发展模式和解决方案，已经引起广泛关注并获得学术界的认可。在《第三次工业革命》一书中，作者杰瑞米•里夫金，美国著名经济学家，认为“在即将到来的时代，我们将需要创建一个能源互联网，让亿万人能够在自己的家中、办公室里和工厂里生产绿色可再生能源。多余的能源则可以与他人分享，就像我们现在网络上分享信息一样”，“互联网技术和可再生能源将结合起来所构成的能源互联网，将是实现能源分布式供应的一种有效模式”。里夫金认为人类目前经过了两次工业革命，都是一种新的能源和一种新的通信技术的结合。能源互联网作为第三次工业革命的支柱之一，是基于“将每一大洲的建筑转化为微型电厂，以便就近收集可再生能源”的“利用互联网技术将每一大洲的电力转化为能源共享网络”。能源供给模式呈现出从集中到分散的演变趋势，资源和生产单位的地理分布从特定区域扩展到无处不在，供给主体从少数能源巨头转变为家庭和个人，大规模集约生产方式模式演化为无数微小单位的集成。在不久的将来，里夫金认为“传输方式由若干远距离超大电网的单向供电转变为遍布全球的能源互联网共享。”

能源互联网的思想中，将来的能源会像现在的信息一样，可以对等的互相分享，人人都是能源生产者的同时，人人也都是能源消费者。目前体系结构下的电网还是集中式的分布、单向传输，而能源互联网则是多向的、交互的、自治的，是分散的结构和拓扑。能源互联网通过改变能源供需方式和结构，将目前从上到下的集中式转型为上下互动的集中式和分布式相结合。通过对能量来源的自由选择和互动管理，能源相关的产业模式也得到互联网式的洗礼，相关产业如分布式制造、插电式交通将藉此而兴起，能源相关的经济结构甚至社会民众的生活习惯都会带来巨大的变革。因此，里夫金在中国国防科技大学承办的“首届中国能源互联网发展战略论坛”上明确指出，“能源互联网的提出更多的是来源于一种哲学和经济学层面的思考，而不仅是一种新的能源技术体系。”

能源互联网的概念已经引发了全世界的广泛关注和讨论。研究人员以信息互联网为参照，认为能源互联网作为一个使用人数更广的网络，更应该关注人的因素，需要充分考虑自己发电、自己掌握能量路由器产生的安全感、分享能源的幸福感、参与能源合作的社会归属感，打造一个用户体验感优先的网路。在社区层面上，个人和家庭以建筑物为主体利用可再生能源，产生了无数微小的能源生产单元，并使用高度稳定性和可靠性的电网将其连通原有的电网。成熟的互联网技

术提供了支撑，将电力输送网络转变成能源互联网，对电能实现智能化控制，还能对用户的决定作出即时反应，及时传送价格信号。这样，自助生产能源的人们能通过网络以无缝对接和对等的方式分享剩余的能源。此外，电动车也能增加电网的稳定性：在非高峰期，电网可以给电动车充电；在高峰期，电动车将不用的电能回输给电网。能量作为一种物质存在的形式，其传输、储存、使用等特性毕竟不同于信息。信息互联网结构设计目标中对性能没有进行严格限制，信息的传输是“尽力而为”的，而能源互联网中的电能供应则不能“尽力而为”，因为信息的断续传输在大多数情况下并不影响用户对信息的理解，电能的供应如果断断续续是绝对不行的，因此，能源互联网体系结构的目标中需要比信息互联网更严格设定标准。

能源互联网的作为一门新兴的学科，自然而然的孕育了众多崭新的研究课题。例如在体系构架和产业发展层面上对区域能源互联网系统构建与场景分析，能源互联网技术、经济与政策演进，区域能源互联网规划设计与经济分析；在技术总体构架层面上对多能流能源互联网仿真分析，信息能量融合的未来基础设施构建以及能源互联网下的未来数据中心架构；在设备期间层面上研究储能梯次利用、不间断电力交换机、能量计算机、能量路由器与能量路由专用协议、新能源接入下的能源互联网电能质量研究；在能源调度层面开展区域能源互联网源网荷储储用一体电能设备协调策略研究、软件定义的能源互联网、数据驱动的能源互联网能量管理、价值驱动的能量分散交换优化与路由算法、能量调度机器人以及基于区块链的能源互联网交易系统；还需要针对用户体验开展用户中心能源互联网接入环境研究、多元主体价值分享的能源互联网运营模式、能量—信息—价值贯通的能源互联网“即插即用”以及直接面对用户的能量体验模型与评估。

本章中，将深入介绍博士后期间研究工作所涉及的、网络基础构架、能量路由智能控制装置和器件技术、以及测试装置测试原理相关的背景知识。

1.1　电能质量控制器的模块化设计

与有源滤波器、无源滤波器关注于改善整个低压电气系统的电能质量不同，电能质量控制器直接面向特定的精密设备的保护。作为一种具有综合补偿能力的电能质量调节装置，电能质量控制器需要能够同时满足对电压和电流质量问题的需求，它应该具备可快速补偿供电电压中的突升或突降、波动和闪变，屏蔽谐波电流和电压，补偿各相电压的不平衡以及故障时的瞬时电压中断等能力，是一项具有综合功能的电能质量控制器。

已有的研究和产品中，大都采用抽屉插卡式，模块化设计。标准化模块化设

计，功率电路和控制电路采用模块或组（插）件结构，相同模块可以互换，提高了使用中的可靠性和可维修性。例如威海凯瑞电气股份有限公司的C-UPQC电能质量综合控制器采用了抽屉式、高智能多制式模块化设计，实现在线更换、在线维护，降低了维护难度，实行零停机工作。采用N+X并联冗余无线技术，各模块机架可完全分离，便于用户以后的扩容或减容，具有使用方便的优点。C-UPQC是目前国际上最先进的一款高效率、高性能的双转换冗余并联系统。在整机中可以对各个模块进行热插拔操作，系统中每一个功率模块的功率为10kVA或30kVA，具有体积小，效率高，绿色环保等优点。根据不同场合需求，其产品有4种制式选择（单进单出、单进三出、三进单出、三进三出）及6种输出模式选择（220V/50Hz、230V/50Hz、240V/50Hz、220V/60Hz、230V/60Hz、240V/60Hz），其选择均由拨码开关完成，可灵活对输入或输出进行设置，以供不同场合使用。

上海坤友电气有限公司出产的SHKYWK-5000电能质量微电脑控制器采用高速微处理器、实时多任务操作系统，可以根据负载变化进行快速投切，实现对每个周波的跟踪补偿；数据存储、交流采样技术、TFT大屏幕彩色液晶显示，实现了实时数据采集、通讯、历史数据存储、故障报警、电网谐波分析、无功补偿等功能，最多可以控制16路电容组,可以直接连接电脑进行联机操作。主要应用于配电网，监测配电变压器、配电线路运行状态监测和补偿电网无功，根据无功功率大小，功率因数和电压范围，自动控制电容器进行补偿，有效地提高供电电压质量、提高配电网络的安全稳定性及减少了经济运行成本。

1.2　电网信号的实时检测技术

电网信号的检测和在线分析，是自治自持的能源互联网节点的基础。随着经济发展社会生活的需求改变，大量的非线性负荷!冲击性负荷的投运，使电力系统中产生了大量的谐波干扰，电压的扰动、波动和闪变，电能质量不断恶化。随着电力市场化改革的推进，供用电双方都对电能质量问题越来越重视，而目前的监测与评定技术还远远达不到供用电双方的实际需求，其中电网信号实时监测和在线辨识技术是一项基础工作因此，开展电网信号实时监测和在线辨识技术的研究,显得尤为迫切和必要,且应用前景广阔。

目前，传统电能质量分析装置仅仅能够测量电压，电流，功率，功率因数以及频率，周期，谐波等基本电能质量参数[53,54],另外由于设计的算法过于复杂往往导致硬件资源不足,则电网信号的异常扰动检测与分类主要通过上位机作离线处理[55]。

对于嵌入式的信号分析，效率是最关键的参数指标，针对高效率低成本低运

算量的检测技术，相关的研究也很多。对于电能质量扰动的检测基本方法是均方根（root mean square，RMS）方法，但其只能检测特殊的扰动事件[130]。离散傅立叶变换（discrete Fourier transform，DFT)方法，包括短时傅立叶变换，short-time Fourier transform，STFT）作为经典的信号分析方法，具有正交、完备等许多优点，而且有快速傅立叶变换（fast Fourier transform，FFT）这样的快速算法，因此已在电能质量分析领域中得到广泛应用[13]。但在运用傅立叶变换时，必须满足以下条件：一要满足采样定理的要求，即采样频率必须是最高信号频率的两倍以上；二要被分析的波形必须是稳态的、随时间周期变化的。因此，当采样频率或信号不能满足上列条件时，利用FFT分析会产生误差。此外，由于FFT是对整个时间段的积分，时间信息得不到充分利用；信号的任何突变，其频谱将散布于整个频带。为解决上述问题，Gabo利用加窗提出了STFT方法，即将不平稳过程看成是一系列短时平稳过程的集合，将傅立叶变换用于不平稳信号的分析。由于实际多尺度过程的分析要求时间窗口具有自适应性，即高频时频窗大时窗小；低频时频窗小时窗大，而STFT的时一频窗口则固定不变。因此，它只适合于分析特征尺度大致相同的过程，不适合分析多尺度过程和突变过程。而且这种方法的离散形式没有正交展开，难以实现高效算法[132]。

小波变换具有时-频局部化的特点，克服了以上FFT和STFT的缺点，特别适合于突变信号和不平稳信号的分析。由于小波函数本身衰减很快，也属一种暂态波形，将其用于电能质量分析领域，尤其是暂态过程分析领域将具有FFT和STFT所无法比拟的优点。由于小波函数本身是一带通滤波器，能够将小波的频率成分分解在不同的频段上，不同频段上的小波系数展现了信号不同的时频特征，能很好的体现信号的时频特征，由于小波并非理想的带通滤波器，其形成的高通滤波器和低滤波器之间存在频带混叠，在实际应用中存在小波基函数选取难的缺点[5,33,36J。希尔伯特黄变换(Hilhert一Huang transform，HHT)方法由经验模态分解法(empinieat mode deeomposition，EMD)及Hilbert变换两部分组成，其核心部分是EMD，其特点是通过EMD对非线性、非平稳数据进行线性和平稳化处理，得到固有模态函数分量(IMF)，再对IMF进行Hilbert变换，以求取各分量的瞬时频率和幅值。该方法能够比较准确地检测出突变、非平稳扰动信号的时间、频率和幅值信息口[37]。HHT方法在应用中存在的主要问题是：在经验模态的分解过程中，在数据序列的两端会出现发散现象，其结果是随着分解过程的不断进行，逐渐向内“污染”整个数据序列而使结果严重失真，且有很多次会出现不完全包络，甚至极不包络的情况，致使经验模态分解无法进行，使该方法的广泛应用受到限制[38]。

S变换是一种可逆时频分析方法，是小波变换和短时傅立叶变换的一种组合。S变换虽然是连续小波变换的一种扩展，但由于它打破了高斯窗仅能在固定时间位置进行伸缩的限制，使得高斯窗也可以平移，因而具有自己独特的优点：信号S变换的时频谱的分辨率与频率(即尺度)有关，变换核不必满足容许性条件等[39-41]。

1.3　电能质量控制系统中的高速网络通信需求

能源互联网是建立在网络基础上的，是能源网络与信息网络的交叉和结合，对网络通信有着独特的需求和研究目的。目前，互联网已经超越了计算机以及通信领域的技术范畴，成为具有超级融合能力的生态环境，正以巨大的力量桌布垫付多个传统产业的生产和经营方式。能源互联网旨在实现可再生能源的高效率利用，满足日益增长的能源需求和减少能源利用过程中对环境造成的破坏。分布式能源供给和共享是能源互联网的主要特征。通过调动各种能源单元的主管能动性，形成具有自我服务、自我维护、和自我更新的生态环境是能源互联网的发展终极目标，其中网络通信技术作为关键的支撑技术之一，必然将起到至关重要的作用。

能源互联网要支持灵活的能量和信息分享，尤其是新能源的接入、分散式能量管理和与用户负荷互动的加强，对数据处理的实时性提出了更高的要求。能源互联网是未来实现电力市场和实时电价的基础，因此大数据处理的实时性要支持从底层的能量交换控制、上层的能量路由与管理，乃至新的商业模式和市场机制等等，大数据采集、分析和处理的速度要求更高。因此，作为技术基础和能源路由器设备发展的前身，电能质量控制系统不仅需要具备高速度的网络通信能力，而且需要特定的网络通信协议个规范设计。

网络协议相关的研究中，命名数据网络具有非常良好的预期。命名数据网络项目在2010年推出，作为美国国家科学基金会(NSF)资助的未来互联网架构(Future Internet Architecture)研究项目，该项目最初完全由美国10家机构的计算机科学家带领。它脱胎于一个更早期的项目—内容数据网络(Content-Data Networking)，这是由TCP/IP主要贡献者之一Van Jacobson架构的网络。

该项目已经获得大约1500万美元的NSF资助。在去年秋天，随着全球各地其他研究机构以及整个行业对NDN的兴趣增加，该项目已经扩展为命名数据网络联盟。该项目已经向美国以外的一些学术研究人员敞开了大门，还有MITRE Corporation等组织和一些IT供应商，包括阿尔卡特朗讯、思科、华为、松下、VeriSign以及戴尔等。以营利为目的的公司必须贡献2.5万美元以加入该联盟，并获得投票

权。然而，该联盟开发的任何协议和架构都将作为开放标准来公布。

“思科很擅长应对技术过渡，以及保持其在网络领域的整体行业领先地位，”Gruia表示，“从他们通过加入NDN联盟，我们看到了这一点。显然，他们的主要动机是在下一次升级周期到来时，他们可以保持其地位。”

该项目的创始人认为，随着互联网流量的增长，一台服务器和IP地址无法应对人们和应用制造的数千到数百万信息请求。该行业正在试图通过任播(anycast)和内容分发网络(CDN)来解决这一挑战，任播即发送请求数据的数据包到很多机器中的一台，而CDN则在靠近网络边缘的多个位置复制数据。不过，CDN仍然要求DNS服务器查找和提供所需的信息。

根据NDN支持者表示，目前我们需要使用这些方法来解决TCP/IP的局限性，但随着命名数据和内容的发展，这些做法会让TCP/IP变得更加复杂。

参与该项目的思科工作人员David Oran表示：“现在的问题是，是否有更好的协议架构考虑了互联网中应用不断变化的性质?” NDN联盟正在努力回答这个问题，其目标是构建一个架构，可以消除对DNS的需要，并基于其名字来传输内容。Oran称：“对于互联网，这是全新的3层网络，而且它将取代TCP。”

1.4　智能控制装置的远程控制

能源互联网中，能量路由器是智能电力设备的升级和扩展，需要具备远程控制的能力，才能够适应能源互联网对于能量交换基础设备的需求。

通过本地互联网和广域互联网的通信技术完成远程控制，远程调试尤其是远程升级和远程调试，自主测试技术，已经成为相关研究的热点。目前，DSP 已广泛应用于通信与信息、信号与信息处理、自动控制、雷达、军事、航空航天、医疗等系统。这些系统均要求其使用功能不断地完善、丰富和升级，或者按照用户的需求作出更新，对这类终端设备的程序维护大多采用开发人员携带编程工具到现场进行操作的方式，不仅工作量极大，费时费力，同时也不利于对整个系统的统一管理和维护。先前的研究主要集中在三个方面：通过程序擦除和烧写FLASH；编写用户BOOTLOADER 程序，完成用户程序的装载；将TCP/IP 协议嵌入到DSP，完成DSP数据的远程传输。而本文将前三项工作集中为一个工程，实现DSP 系统程序的自动更新和更新后程序代码的自加载。此方法能提高效率，降低维护费用，提高产品制造商对用户的服务质量。设计的自加载模块解决了DSP芯片级Bootloader 程序无法多次调用、加载程序长度有限制等局限，使DSP 在启动时根据物理地址的不同映射可有选择性地加载应用程序。

与上位机传统的通信媒介是 RS232，RS485，USB，CAN 总线，因为它们

传输距离和成本的限制，使得这些方式在实际应用中略显不足[1]；虽然网络技术为嵌入式设备的更新提供了长距离的传输能力，但是在网络无法到达的复杂环境应用时又暴露了它的局限性。通用无线分组业务(general packet radio server，GPRS)的方便廉价使其成为首选通信方案。与上位机传统的通信媒介是 RS232，RS485，USB，CAN 总线，因为它们传输距离和成本的限制，使得这些方式在实际应用中略显不足[1]；虽然网络技术为嵌入式设备的更新提供了长距离的传输能力，但是在网络无法到达的复杂环境应用时又暴露了它的局限性。通用无线分组业务(general packet radio server，GPRS)的方便廉价使其成为首选通信方案。

有研究DSP 程序引导启动原理和FLASH 烧写原理的基础上，结合GPRS通信技术，设计了一套DSP 程序远程升级系统。该方法成功应用到了基于TMS320F2812DSP 的航标灯遥控遥测系统上。

基于UART 的通过串行通信进行DSP 远程在线编程是另外一种实现远程控制的方法。这种方法的优点有:串行接口, 信号线少, 升级设备简单如利用普通PC 机就可以升级更新嵌入式系统内的DSP 程序;使用RS422 串行通信则可以实现更远距离在线编程,抗干扰性能好;特别适合各种设计中有串口通信, 串口复用更新DSP 程序的场合, 不用更改硬件, 适用于工业控制、遥测、复杂环境下的特种设备检测和更新等。

1.5　智能控制装置的自主控制

远程控制基础上，智能控制装置需要有足够的自主控制能力，才能够对电网信号做出迅速及时的响应和动作。 FPGA计算能力的开发还远远不够，逻辑性处理能力从主控制芯片DSP上迁移到采样、作动设备才是技术发展的主流。

FPGA计算，也被成为是可重构计算(Reconfigurable Computing，RC)，FPGA的可重构运算分为动态系统重构和静态系统重构。FPGA（现场可编程门阵列）动态重构技术，是指基于SRAM编程和专门结构的FPGA，在一定条件下，不仅具有在系统重新配置电路功能的特性，同时还具有在系统动态重构电路逻辑的能力。

FPGA动态可重构技术就是对FPGA的全部或者部分逻辑资源实现在系统的动态的功能变换，动态可重构FPGA则是基于动态重构技术的一种可在系统实现动态配置的新型FPGA芯片。相对于静态系统重构，动态部分重构缩短了重构的时间，而且在重构时，非重构部分依然运行，其寄存器中的数据不会丢失，从而减少了重构系统的开销，提高了系统运行的效率。可重构计算的概念早在20世纪60年代就已提出。在通用微处理器上也运用了这一思想，如组件就是利用多路选择器来

实现功能的变化，而这些组件一般与计算结构不发生直接联系。目前，可重构计算已有较大发展，主要目标是希望通过硬件可编程，来自适应计算任务的需求，以期达到最佳性能；而且这种硬件结构的变化，能实时地适应计算任务要求的变化。

PFGA可重构计算的优点是硬件设计的实现基于软件的灵活性，并且保持了传统的基于硬件方法的执行速度。其体系结构可变的特点，很好地适应了实际应用中的多元化需求。

FPGA处理信号，处理逻辑的相关研究进展迅猛，应用场景已经或正在扩展到社会和经济的哥哥方面。 FPGA的处理能力越来越大，作为辅助或者前置信号预处理的能力越来越强。基于FPGA作为DSP为计算核心的控制器的辅助控制和计算设备，完成远程自主控制，执行死锁保护等关键性业务，或者完成信号分析，通信信号检测等大运算量的任务都成为研究的方向。

1.6　电能质量控制器嵌入式实时控制软件技术

电能质量控制器作为一种智能化的电子产品，本质上是一种嵌入式的系统。一个嵌入式系统装置一般都由嵌入式计算机系统和执行装置组成，嵌入式计算机系统是整个嵌入式系统的核心，由硬件层、中间层、系统软件层和应用软件层组成。执行装置也称为被控对象，它可以接受嵌入式计算机系统发出的控制命令，执行所规定的操作或任务。执行装置可以很简单，如手机上的一个微小型的电机，当手机处于震动接收状态时打开；也可以很复杂，如SONY 智能机器狗，上面集成了多个微小型控制电机和多种传感器，从而可以执行各种复杂的动作和感受各种状态信息。

常见的系统设计中软件层面有两种截然不同的技术路线：基于嵌入式操作系统的体系构架和无操作系统的软件构架。

嵌入式操作系统（Embedded Operation System，EOS）是一种用途广泛的系统软件，过去它主要应用于工业控制和国防系统领域。EOS负责嵌入系统的全部软、硬件资源的分配、任务调度，控制、协调并发活动。它必须体现其所在系统的特征，能够通过装卸某些模块来达到系统所要求的功能。已推出一些应用比较成功的EOS产品系列。随着Internet技术的发展、信息家电的普及应用及EOS的微型化和专业化，EOS开始从单一的弱功能向高专业化的强功能方向发展。嵌入式操作系统在系统实时高效性、硬件的相关依赖性、软件固化以及应用的专用性等方面具有较为突出的特点。EOS是相对于一般操作系统而言的，它除具有了一般操作系统最基本的功能，还有以下功能：如任务调度、同步机制、中断处理、文件处

理等。采用操作系统的支撑，可以带来的优势是简化软件设计所需要的基础工作，软件工作人员可以更加集中时间和精力于业务逻辑相关额程序设计。随之而来的弊端是会产生对操作系统的依赖，因为现在主流的嵌入式操作系统之间缺乏统一性，软件系统的移植过程代价太大，工作量不亚于重新开发一遍。

无操作系统的软件构架，有时也被业界称为裸机程序。由于没有操作系统的支撑，所有的驱动，资源管理都需要从零开始，因此带来的工作量会有所提升。但是，由于摒弃了操作系统的约束和依赖，程序设计的可控制空间会变得更大，灵活性和执行效率方面，程序设计人员可以充分发挥能力，达成更加高效率的代码实现。

电能质量控制器常见的体系构架中，DSP或者ARM为计算核心的情况下，无论是使用嵌入式操作系统，还是采用误操作系统的精简设计，都有诸多的成功案例。

1.7　智能电力控制装置的测试与认证

电能控制装置，能量路由器由于可靠性的需求，需要作出充分完整的测试和考核，才可以进行装置的实地部署。为了模拟电能控制装置的运行情况，就需要构造大功率，高电压的测试场景对装置的运行性能进行检测。这种专业的需要对测试设备和测试技术都是是一个严峻的挑战。

已有的测量装置模拟电网信号的技术手段主要有三种：阻抗形式、变压器形式和电力电子变换形式。阻抗形式的电压发生装置造成的能量损耗较大,电力电子变换形式的电压发生装置成本高，控制复杂，可靠性不够。传统变压器形式的电压发生装置比阻抗形式能量损耗要小，结构简单，容易实现，但普通变压器变比不可调，所获得的电压变化幅度是固定不便的，若采用带中心抽头的变压器，设计和工艺复杂，造价高昂并且不适合于高电压等级的应用。而且，所得到的电压等级类型与抽头数量相关。另外，变压器形式的电压发生装置不能完美的实现对电压相位的控制。

以往的测试手段具有设备复杂，造价高昂，测试过程费时费力，耗费资金资源等缺点。根源在于它们多数采用的是传统耗能式阻抗负载，并且均未考虑电压信号发生装置能量回收利用的问题，造成了能源的白白浪费的同时，本身也是安全的隐患，并且会对所依托的电网造成较大额影响。传统负载的通风、散热都需要进行相应的设计，为降低因耗能负载带来的温升则需要风机等来降低温度，带来能源的二次浪费。因此，需要在测试相关的领域中开展相关的研究，来保证设备的高效率测试，高品质测试，最终提升能量路由装置的可靠性稳定性。

1.8　总结

电能质量控制器和电能质量控制技术，虽然已经得到一定时期的发展，但是依然存在诸多需要改进的方面和值得深入研究的课题。本文中将在电能质量控制器硬件构架设计，软件技术方面提出新的解决思路，以提高系统的可用性和可靠性。其中包括，改善电能质量控制器的远程调试以及远程软件升级技术；利用FPGA计算的可编程特性，完成电能质量控制器远程自主的保护以及可编程的信号检测；利用FPGA计算的高效特性，完成电能质量控制器嵌入式计算系统中高效率完成电力信号的检测分析以及预处理；完成嵌入式环境下自主的软件平台技术；利用改进的小波分析技术，提高电能质量控制器对电网信号的分析效率；改进电能质量控制器远程监控技术；电能质量控制器控制器测试技术，改进测试环境和测试方法的能源损耗。

第2章　电能质量控制装置中的智能控制器和智能控制系统

随着近些年来我国电力事业的快速发展，装机容量的大幅度提升，供需矛盾已经逐渐不再是电力系统发展的主要矛盾。电网中非线性负载、冲击性负载和不对称性负载不断增加，同时，信息时代各种精密、敏感的生产设备对传统的电网电能质量提出了更高要求，这些都使得电能质量成为日益凸显的主要问题。各类微电子、半导体、生物医药、精密制造、大型金融数据中心等敏感用户对电网的供电电能质量提出了更高要求。对供电企业而言，电能质量问题既是挑战，也是机遇，电网中大量敏感负荷也是供电企业潜在的高端用户，对高品质供电有着强烈需求。

本章将介绍电能质量控制装置中的智能控制器和智能控制系统，并结合深圳电网电能质量综合治理研究与工程示范项目的实践结果，介绍智能电能质量控制的构架和技术创新。

2.1　序言

深圳电网电能质量综合治理研究与工程示范项目立足深圳电网当前面临的实际问题和迫切需求，主要开展大型城市电网供电电能质量规范体系的研究、重点区域电能质量问题的分析与治理方案研究、敏感用户高品质电力需求分析与对策研究、电能质量治理装置柔性控制、新型拓扑结构和容量优化等关键技术研究，实现方案定制、装置研制与工程示范，为深圳电网重点区域和敏感用户的电能质量综合治理提供理论依据和技术支撑，对全面提高大型城市电网的电能质量和提升敏感用户的电能体验具有积极的示范作用及推广意义。

结合深圳电网电能质量问题突出区域调查研究与分析，开展电能质量监测、评估规范体系建设；研究大型城市电网电能质量监测与治理选点的差异化配置策略；研究中压配电网新一代动态电压调节器的拓扑结构、动态响应速度及综合补偿功能；研究电能质量的柔性控制技术，实现动态电能质量综合补偿装置的多目标协调控制；研究新型容量优化方法，实现有限装置容量下的电压电能质量问题的全面抑制。进而完成重点区域和敏感用户的综合治理方案定制、装置研制与工程示范。

针对深圳电网主要面临的电能质量问题，选取重点区域和敏感用户形成定制化的电能质量综合治理方案，研制中压配电网新一代动态电压调节装置和重要工业用户动态电能质量综合治理装置。针对选择区域的电能质量综合治理装置的安

装地点、电压等级以及相互之间的协调配合方案进行详细的比较研究，给出区域电能质量治理的优化解决方案。电能质量综合治理装置的调试和运行，量化总体成本、治理效果、综合效益等关键指标，为配电网的区域电能质量治理提供具有广泛适用性且经济实用的解决方案。对选定的重要和敏感负荷进行特性分析，设计动态电能质量综合补偿装置功能要求和性能指标；解决重要和敏感负荷的电压暂降等问题的综合补偿装置的调试及运行，开展电能质量综合治理工程示范。

用电客户对于电能质量总体要求的高低。通常情况下，对用电客户的敏感设备同时受到多种电能质量的共同影响，具有很大的不确定性。这些电能质量问题的影响结果无法直接通过叠加各单项电能质量指标影响结果来实现。因此，用电客户所属的行业类别较能客观地反映客户设备的类型、容量和工艺，以及客户负荷对于电能质量的敏感程度。在实际使用中，电能质量的好坏更多取决于用户的敏感程度和实际体验。因此，电能体验质量的指标体系应综合考虑供电质量指标和用户指标，其中用户指标主要包含用户投诉、用户负荷敏感度和用户电能体验调研等方面。

2.2　智能控制器系统构架的硬件部分

在智能控制器的硬件方案中，采用了分立板卡和总线结构，如图2.1所示。整个控制系统由主控板卡、模拟量输入（AD）板卡、模拟量输出（PWM）板卡、开关量信号输出板卡、开关量输出板卡、外部设备光纤通信板卡、以及机箱背板构成。

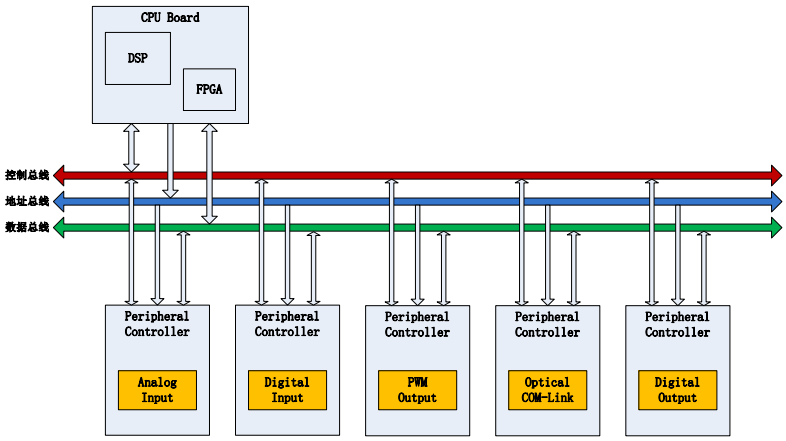

图 2.1　控制器的硬件结构

其中主控板是整个控制的控制核心，由主控板实现整个控制系统的核心计算，通过数据总线发送信号给其他各电路板，并接收其他各电路板反馈回来的信号。主控板的核心控制器件是TI公司的TMS320F28335和Altera 公司的FPGA芯片EP1C12Q240I8。“FPGA+DSP” 结构是目前高性能处理系统的主流搭配。这种结构非常灵活，有较强的通用性，适于模块化设计，有利于提高算法效率，缩短开发周期，并易于维护、扩展和修改，减少硬件电路体积，利于升级优化。

模拟量输入（AD）板卡负责将模拟量的信号处理成数字数值，然后通过数据总线与主控板进行通信，将转换结果交给中央处理DSP处理。电力系统中的电压、电流信号一般不能直接送到A／D器件的输入端使用，而需要先经PT、CT将电压、电流降低，然后再经过互感器、信号调理等预处理后供A／D使用。鉴于本系统要求较高的检测速度以及精度，故直接选用霍尔元器件进行电压、电流检测，再经硬件电路预处理，转换成可供A/D芯片处理的模拟信号。本系统的霍尔器件要求能够处理10KV电压，转换为5V电压水平的信号传递给AD芯片；本系统的电流霍尔器件要求能够处理300A的电流信号，转换为5V电压水平的信号传递给AD芯片。AD芯片选型为AD7606，能够同时处理8路模拟信号的采集。

在模拟量输出PWM板上，FPGA通过数据总线接收主控板输出的补偿电压信号，并比较计算生成H桥PWM脉冲。 FPGA输出的PWM脉冲信号经电平转换，输入到光纤（写）接头。

开关量信号输出板卡处理系统中开关量状态检测。系统的故障反馈信号或状态信号输入到IO板，经电平转换、光电隔离处理，然后输入到FPGA，由FPGA实现MUX等功能，最后由数据总线传送到主控板DSP。对于需进行紧急或特殊处理的故障信号，由FPGA输出后，通过背板走线直接传输给主控板。

开关量信号输出板卡负责完成开关式外部设备的控制信号生成。开关量输出板卡接受DSP通过背板总线传输来的控制信号，完成外部控制信号的生成。

智能电力控制器的功率输出装置采用了江苏张家港西威电子的功率模块器件，与外部接口采用了光耦合的通信技术。外部设备光纤通信板卡用于完成于外部设备的光通信，光通信协议采用了自定义的帧格式。每一帧中包含16位有效数据，帧频率为30KHz。光载波频率3.125MHz，所以光纤板卡上的光输出和光敏感器件需要采用高速光器件。由于需要处理复杂的通信编解码逻辑，光通信板卡的控制核心FPGA采用了EP3C25F324I7芯片。

2.3　智能控制器系统构架的软件部分

Elop DVR系统是在DVR主控板卡的DSP上运行的实时控制系统，目的是按照DVR调整策略对电网信号检测，并且驱动能源设备对标的电网参数进行调整的软件。软件系统的任务时利用模拟和数字信号的测量能力，对目标电网的参数进行实时监测和分析。对电网的电压暂降（SAG）故障实时判断，并且驱动对应的输出装置，及时做出相应动作。DVR装置中配备工控机作为系统的上位机对主控系统进行信息处理记录和宏观控制。 DVR装置与工控机以以太网ENET的机制进行通信。

DVR系统的DSP采用了TI公司的F28335，开发环境是CCS 3.3。为了保证软件系统的实时特性，软件系统采用了无操作系统的直接应用构架。

由于抛弃了操作系统的支持，直接应用的构架需要包括从底向上的设备和模块驱动设计。软件系统的结构如下图所示。

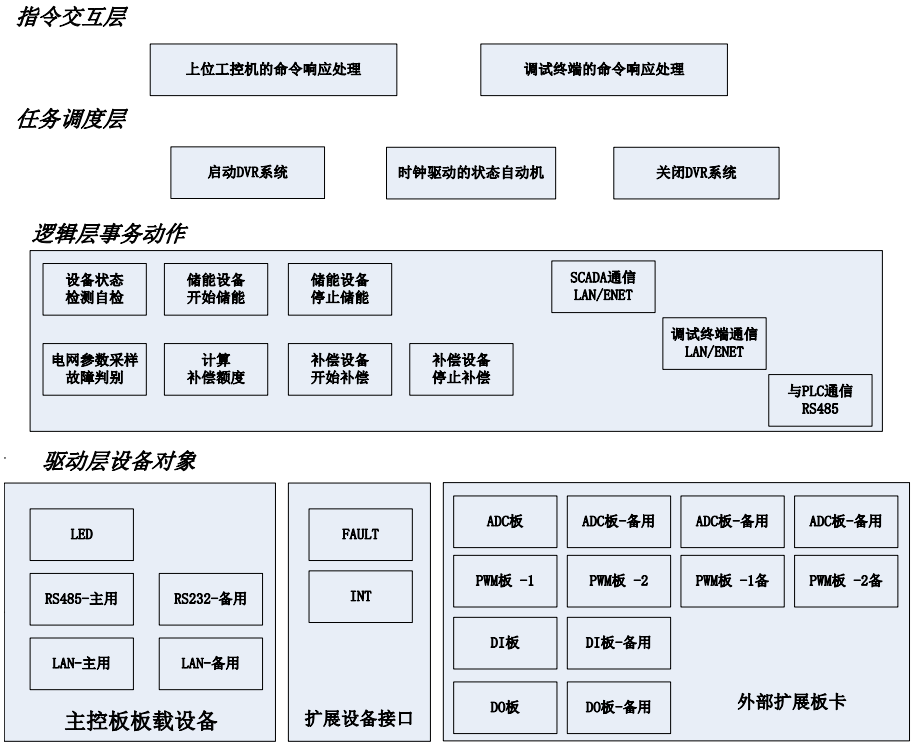

图 2.2　控制器的硬件结构

如图2.2所示，智能控制的软件采用了层次结构。从底层向上层依次为设备驱动层、业务逻辑层、任务调度层和指令交互层。层次之间采用了松散耦合的模块化设计，避免共享数据对程序设计造成的维护困难。层次内部和模块内部完成自身数据和处理的完整封装，对外的接口统一为没有副作用的函数调用。层次之间，模块之间通过函数调用的方式进行数据和控制的交互。

设备驱动层负责完成控制器中的板卡设备的控制和数据交互。所有的外部板卡抽象成“设备”这种统一的概念，具体的控制操作映射到内存空间特定的区端。DSP通过对该空间映射好的控制寄存器和数据寄存器进行读写操作，就可以完成对外部板卡设备的操作。外部板卡设备作为统一的概念，需要完成硬件版本信息检查，控制信号接收，中断信号发送，数据总线读写等功能。统一的操作模型使得程序的结构能够规整化，便于软件系统的开发和维护。事实上，这种抽象规约也是下一代产品的技术规范。

包括外部板卡设备的地址寻址空间映射关系如下表2.1所示。

业务逻辑层构建在设备驱动层以上，将设备的动作或者动作序列组成的业务操作进行一层封装，用于抽象的设计电力装置的业务动作。例如，指令驱动设备进行自检，调整继电开关设备开始或者停止储能装置的储能，驱动补偿输出直流逆变装置的开始和停止等业务层面上的操作。同时业务驱动层还定义了与监控终端的的通信基本功能模块，与控制器外部的其他智能装置例如PLC等的串行通信驱动也在这个环节进行实现。

任务调度层提供给驻地电力配电部门的操作动作，配合完成电力调度相关的指令。调度指令是宏观规模上的设备操作，典型的调度操作包括启用DVR装置和停用DVR装置，进入保护离线状态。

指令交互层是提供给终端用户的最终操作界面和结果显示相关的功能，交互层建立在网络通信和任务调度层之上。指令交互层的任务是侦听网络连接通信链路上的下行指令和数据，完成对应的指令响应，并形成对应的结果反馈信息。指令交互层是软件结构中最上层的部分，构建在下层模块的功能基础之上。

软件实现过程中，控制装置的软件程序根据功能和层级的划分，主要的程序构架由下表中的文件构成。软件的编码语言是C语言，利用了该语言的高实现效率和易于维护的优良特性。业务逻辑驱动层在统一的头文件中加以声明，函数的实现分别放置在C文件中。

文件名和实现的业务驱动函数列表2.2如下：

2.4　智能控制器远程访问的网络协议

电力装置控制器需要具有远程控制的功能，目前通用的做法是配备网络传输设备完成高速的信息通信，并在其上建立远程通信和控制能力。文中控制器采用了以太网络为基础通信构架的设计，本节将介绍电能质量控制器网络传输子系统的设计方案和具体实施规范。

网络通信子模块采用轮询方式对网络传输的事件进行处理，网络通信任务为

表 2.1　电能质量控制器地址寻址空间映射表

区域名称	起始地址	结束地址	长度	类型	说明
RAMM1	0x000400	0x0007FF	0x000400	DSP-RAM	堆栈
ENET-0	0x004000	0x0043FF	0x000400	IO	
ENET-1	0x004400	0x0047FF	0x000400	IO	
CPU-BRD	0x004800	0x004FFF	0x000800	IO	
RAML0	0x008000	0x0084FF	0x000500	DSP-RAM	cinit
RAML1	0x008500	0x00E8FF	0x006400	DSP-RAM	text
RAML4	0x00E900	0x00F8FF	0x001000	DSP-RAM	ebss
RAML5	0x00F900	0x00FFFF	0x000700	DSP-RAM	const
SAGBUF	0x180000	0x1F0FFF	0x071000	SRAM	sag-buff
SRAMBUF	0x1F1000	0x1FFFFF	0x00F000	SRAM	task-buff
ADC-0	0x200000	0x200FFF	0x001000	IO	
ADC-1	0x201000	0x201FFF	0x001000	IO	
ADC-2	0x202000	0x202FFF	0x001000	IO	
ADC-3	0x203000	0x203FFF	0x001000	IO	
DI-0	0x204000	0x204FFF	0x001000	IO	
DI-1	0x205000	0x205FFF	0x001000	IO	
DI-2	0x206000	0x206FFF	0x001000	IO	
DI-3	0x207000	0x207FFF	0x001000	IO	
PWM-0	0x208000	0x208FFF	0x001000	IO	
PWM-1	0x209000	0x209FFF	0x001000	IO	
PWM-2	0x20A000	0x20AFFF	0x001000	IO	
PWM-3	0x20B000	0x20BFFF	0x001000	IO	
DO-0	0x20C000	0x20CFFF	0x001000	IO	
DO-1	0x20D000	0x20DFFF	0x001000	IO	
DO-2	0x20E000	0x20EFFF	0x001000	IO	
DO-3	0x20F000	0x20FFFF	0x001000	IO	

了不影响关键的数据采集和控制输出任务，放到了系统最低优先级的空闲等待循环中。由于多个网络传输通道需要同时处理，所以在控制循环中所有的操作全部是立即返回，不允许出现自旋锁。需要延时的功能全部采用了记录和检查时间戳

表 2.2　电能质量控制器地址寻址空间映射表

文件名	功能简述	实现的关键函数
dvr_command.c	调试终端指令响应。	$uint32command_handler$ $(uint8 * buf, uint32len, uint8 * *presult)$;
dvr_compensation.c	SAG电压跌落时的补偿额度计算，以及补偿设备的驱动。	int phase_lock_loop(); void calculate_compensation(); void modulate_output();
dvr_context.c	装置状态的程序表达。	int load_default_context();
dvr_devices.c	DVR设备的控制封装。本文件中完成DVR设备的控制到外部板卡设备的端口映射关系。	int start_charge(); int stop_charge(); int switch_in(); int switch_out();
dvr_dqmath.h	DQ变换和反变换	
dvr_faluthandler.c	装置故障诊断	interrupt void fault_handler(void);
dvr_output.c	PWM调制输出和OGT晶闸管控制脉冲的输出。	
dvr_post.c	Power On Self Test DVR的上电自检模块	void post_error(char* reason);
dvr_sagsample.c	通过AD板卡上的设备，获取SAG电压监测数据。	void soft_protection(char* reason); void update_sagsample();
dvr_scada.c	与上位机的通信和服务模块，依赖于到网卡和对应的驱动。完成上位机控制命令的解析执行，以及像上位机发送监视数据的进度。	void tcp_handler(socket s, uint16 port); void scada_service(); void scada_service_0(socket s, uint16 port); void scic_handler();
dvr_taskflow.c	装置状态切换逻辑和状态控制流程	interrupt void dvr_taskflow(void);
dvr_utilities.c	通用字符串处理基础的数学函数	float dvr_sin(float arc); float dvr_cos(float arc); void dvr_dq(…);

的方法实现。

由于网络传输过程所特有的不稳定性，网络传输子系统需要具备强大的容错特性。当数据传输发生错误的时候，能够完成数据有效性和完整性验证，保护控制器不受非法数据的烦扰。当网络链路发生中断，比如控制器复位，上位机软硬件重启，或者硬件线路暂时断开的时候，能够完成检测以及通信链路的自动重新建立连接。

2.4.1　监控功能模块网络协议

按照DVR控制器的应用场景，需要上位机控制程序能够通过网络通信的方式对控制器完成远程的信息交换和远程控制。具体的传输功能包括，装置状态数据上报、异常情况下告警数据上报、快速状态数据录播的上报，以及远程控制信令传输。

按照W5300芯片的技术规范，为了满足网络传输任务需要，设置了三种五个自动机分别处理不同的网络通信任务。其中，TCP模式下状态数据上行通信、告警数据上行通信、录播数据上行通信要求DSP运行在客户端模式，主动发起连接请求到上位机控制器，连接建立以后定时发送数据包或者由事件触发发送数据包到上位机；TCP模式下的指令控制响应功能要求DSP运行在服务模式，即初始化完成以后打开TCP的端口3008进行侦听，当有上位机的链接请求到达的时候被动的响应式的建立连接，然后等待控制指令的下达，做出对应动作并且返回执行结果。

网络通信中TCP协议是有链接信息的通信协议，按照连接的发起方和等待方可以区分为服务端和客户端，两种模式下需要的控制逻辑存在有明显的区别。

控制器上的嵌入式系统虽然能够实现完整的TCP数据传输，但是由于应用场景的特殊性，并不需要实现完整的IEEE规范的TCP状态切换逻辑，实际上用到的只有四种状态：CLOSED，INIT，CLOSE_WAIT以及ESTABLISHED。TCP模式下的客户端模式自动机状态切换逻辑如图2.3所示：

初始化以后TCP套接字链接对象处于Closed状态，自动机将调用socket函数创建套接字对象，成功以后进入INIT状态。然后，自动机将调用connect函数，试图与上位机建立连接，成功以后进入ESTABLISHED状态，然后保持在ESTABLISHED状态，进行数据的发送。当系统需要复位的时候主动调用close函数关闭连接将套接字对象复位到CLOSED状态。当对方，也就是上位机主动关闭连接的时候，套接字将进入CLOSEWAIT状态，这时候系统将调用close函数，将套接字对象复位到CLOSED状态。

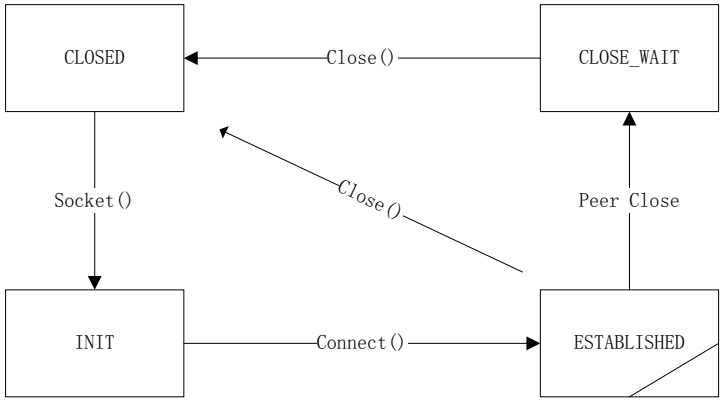

图 2.3　控制器传输通道TCP模式下的客户端控制逻辑

TCP模式下的服务端模式自动机状态切换逻辑如图2.4所示：

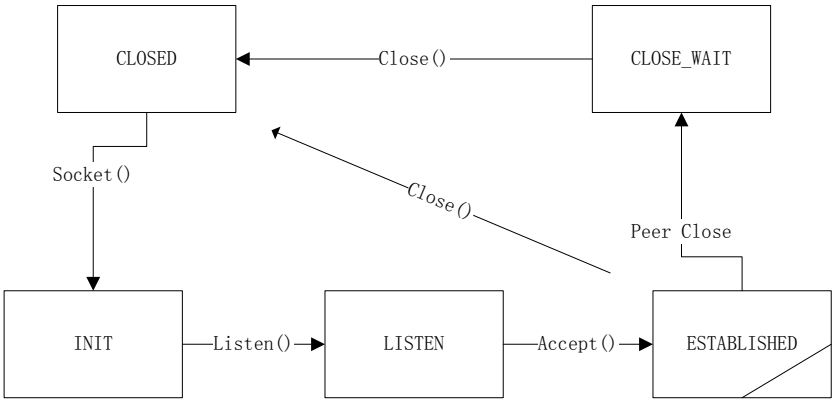

图 2.4　控制器传输通道TCP模式下的服务端控制逻辑

初始化以后TCP套接字链接对象处于Closed状态，自动机将调用socket函数创建套接字对象，成功以后进入INIT状态。然后，自动机将调用listen函数，进入等待连接进入的侦听状态。当上位机试图建立连接的时候，调用accept函数接收呼入链接请求，成功以后进入ESTABLISHED状态，然后保持在ESTABLISHED状态，进行数据的发送。当系统需要复位的时候主动调用close函数关闭连接将套接字对象复位到CLOSED状态。当对方，也就是上位机主动关闭连接的时候，套接字将进入CLOSEWAIT状态，这时候系统将调用close函数，将套接字对象复位到CLOSED状态。

2.4.2　调试功能模块网络协议

远程调试功能需要建立满足调试工作场景需求的通信协议。调试模式下，由于经常出现通信中断等情况，所以系统采用了无状态的UDP通信协议完成调试指令信息的发送以及调试指令结果的传输。调试模式下的远程调试功能要求DSP运行在UDP 协议框架下建立服务模式，侦听3000端口，当调试指令到达的时候，做出对应的动作并且返回执行结果。

UDP模式下的状态机切换逻辑如图2.5所示：

图 2.5　控制器传输通道TCP模式下的控制逻辑

初始化以后，UDP套接字进入CLOSED状态，此时系统调用socket函数，以UDP为参数将套接字设定为UDP模式，成功以后即可进入UDP模式。在UDP模式下，没有连接建立和连接关闭的操作，套接字状态将永远停留在UDP模式无需关闭。

2.5　智能控制器远程监控子系统

智能控制器的远程监控功能建立在TCP为基础的网络传输协议之上，完成控制器在运行状态下与监控计算机系统的数据通信。远程监控子系统需要完成的功能包括设备运行状态的定时发送，设备运行过程中异常情况的实时发送，高速度数据记录缓冲数据区的实时录播数据发送，以及控制用信号通路的数据传输。

为了便于完成数据有效性的校验，网络协议数据传输采用了帧式传输策略，所有帧结构公用一个有效性标志头结构，该结构体由24字节构成。其中包含了帧同步定位标示字4字节，有效载荷长度2字节，传输数据的用途标示字2字节，时间戳8字节，装置类型2字节，以及数据校验码6字节。

2.5.1　状态数据上报

状态数据指的是DVR控制器装置运行过程中各个采样点可控制点以及自身运行配置信息，通过网络以快照的形式，正常情况下每一秒钟向上位机上报一次。状态数据中包含了系统运行状态信息，被检测的目标信号有效值实时计算结果，以及装置内外部环境参数等。

状态数据帧的长度为392字节，内容的的排布根据2字节对齐的方式手动进行了调整优化，保证编译过程中不会出现额外的空间间隔。

2.5.2　告警数据上报

告警数据是当DVR装置检测到自身发生故障，或者被监控的电网发生SAG事件的时候，向上位机控制程序发送的事件信息。发送的时机是事件监测结果发生或者SAG处理结束，发送的告警数据帧结构中包括告警事件类型，告警事件来源，事件序列号，告警事件的参数，告警事件相关的采样值等信息。

告警事件的发送由装置的运行事件触发，控制器的网络传输模块一旦检测到事件发生，就会立即发送告警事件。

2.5.3　录播数据上报

录播数据是当SAG事件前后一段时间内的多个模拟量测量通路的快速瞬时数据，整理成数据包的格式，发送到上位机，以供后续分析。录播数据发送的时机是SAG事件结束处理，发送的帧结构中包括了需要出发录播的事件类型，编号，录播通道的来源，当前数据区块的序列号，以及每一帧需要传输的数据区块。

数据区块的长度设置考虑到TCP协议分片传输机制的限制，每一帧的长度设定为1056字节，每一帧的数据区块包含了256个浮点数。数据区块的设计可以避免TCP自身的分片机制影响数据传输的自洽性。

录播数据一共有18路模拟信号，每一路模拟信号通过帧结构中的Phase成员进行区别。每一路模拟信号需要传送的浮点数格式的采样点数据为25600个，而每一个数据帧只能够发送256个浮点数，所以每一路信号需要100个数据帧才能够传输完毕。而所有18路模拟采样数据传输完毕，则需要1800个数据帧进行传送。1800个数据帧的发送顺序是按照模拟通路进行分组，即第一组100个数据帧用于传输第一路模拟采样信号，第二组100个数据帧用于传输第二路模拟采样信号。余下的其他数据分组依此规则顺序传输。

2.5.4　远程控制

远程控制功能下，DSP侦听模式等待上位机的指令，受到并且校验通过以后立即执行，并且将执行结果以反馈数据帧的格式发挥上位机，以供后续处理。远程控制的网络通信是上位机操作人员的人为操作触发的，任何控制指令的执行都需要立刻返回。指令中指令功能码、子功能码以及指令所携带的参数由使用者进行约定。

下行的指令发送和上行的指令执行结果反馈帧采用了同样的结构，包含指令的功能分类，功能编码，指令参数以及指令数据。上行数据的回传保证了指令发送和执行结果的有效性校验。

2.6　智能控制器远程调试子系统

调试终端使用端口3000（UDP模式）和3001（TCP模式）。控制终端可以使用AB网线线序AA网线线序自适应的网卡直接连接到DSP主控板上的内侧网口，也可以经过路由器转接以后以无线方式接入。

网络传输过程中，DSP启动正常以后进入侦听（应答）模式，等待上位机的数据包到达（UDP模式），或者连接建立的握手信号（TCP模式）。通信链路正常以后，上位机控制台窗口接收用户输入的文本信息，作为命令下发到控制器，控制器负责解析该字符串所代表的动作和指令，做出响应以后将结果反馈给上位机的调试终端程序，最终打印出执行结果的信息供用户审阅。

2.6.1　命令格式

调试指令为不超过64字节的字符串构成，由空格分开的三部分构成。指令名称、主参数、副参数构成，中间以空格作为分隔符加以区别。参数可以是十进制数、0x起始的十六进制数字或者形如1.234的浮点数数值。

特别的，对于r指令，有简写格式即省略指令名称，直接将主参数表示的地址输入以后按回车键，控制终端会自动补齐相关的信息，构造读取指令。

2.6.2　文字编码

上位机程序采用单字节的模式进行字符串的接收和处理，即每一个字符占据一个8位的地址空间。而控制器上是16位编址的系统，等价于双字节的模式进行接收存储和比对。所以在网络传输过程中，控制器接收到调试指令字符串以后需要有一次扩展；而上位机接收到控制器发送的字符串信息以后，则需要进行一次合并的操作，才能够构造出正确的文字信息。

2.6.3　网络传输协议

上位机的通信逻辑是：

1，发送指令字符串。

2，接收指令字符串的原样反馈确认。

3，接收执行结果的数据返回包，其中有两种规格。一种长度为固定的1000，表示还有后续的数据包到达；一种是固定长度的4，表示当前的指令已经执行结束所有的数据都已经发送完成。

控制器的通信逻辑是：

1，等待指令到达。

2，立即给予指令行接收确认，即通过套接字发送一个UDP数据包内容是下行指令字符串的原样副本。

3，解析并执行指令，根据指令行为的设计，区别有无额外数据返回。

4，如果有额外数据返回，将数据拆分成若干个1000字节长度的数据包。如果剩余字节不满1000则使用0补充占位。

5，额外数据全部返回以后，发送一个固定长度为4的指令执行结束标志，4字节的数值表示指令执行的结果是否正确。

2.6.4　网络调试终端的指令集

本节介绍网络调试终端的指令集合和说明。

调试终端使用端口3000（UDP模式）和3001（TCP模式）。控制终端可以使用AB网线线序AA网线线序自适应的网卡直接连接到DSP主控板上的内侧网口，也可以经过路由器转接以后以无线方式接入。

终端调制指令分为四类：网络通信功能的基础测试、DSP端口的基础IO操作、DVR板卡的逻辑操作和DVR装置的系统控制指令。

指令由指令字和指令字携带的一到两个指令参数构成，指令参数可以是十进制数，0x起始的十六进制数字或者中间存在小数点的浮点数构成。下面的表格中，必选参数使用简单字符串模式表示，必选参数缺失的话，会自动使用0/0x0/0.0f作为数据操作。可选参数使用方括号“[]”包围的字符串表示，可选参数存在或者不存在的时候具有不同的指令含义。

指令返回值分为两类，一是直接的指令执行结果，二是指令执行过程中生成的批量数据。直接的指令执行结果直接打印在控制台上，附带的批量数据会以数据记录的方式保存为文件，以供后续处理。下面分别介绍四类指令。

网络通信功能的基础测试相关的操作指令如下表2.3所示。

DSP端口的基础IO操作相关的操作指令如下表2.4所示：

DVR板卡的逻辑操作相关的指令集是指令集中最复杂的部分，按照操作目标不同，分为5各类别进行介绍。

CPU板卡相关的调试指令如下表2.5所示。

表 2.3　网络通信功能的基础测试

指令字	指令参数	返回结果和说明
h,help	-	打印帮助信息，控制台上会返回简短的指令列表和说明。
t,T	-	新板卡程序中固定为0x55AA77CC。该指令能够迅速返回标志着网络方式的通信功能正确。与旧版本的0x55AA66BB相互区别。
reset	-	远程方式指令DSP进行软件复位。

表 2.4　DSP端口的基础IO操作

指令字	指令参数	参数说明	返回结果和说明
r	port	port 需要读取的目标端口。	端口读取结果。
w	port value	port需要写入的目标端口。 value需要写入的数据，有效位数最多为16。	固定为0。
0x***	[value]	value参数缺失的时候等价于r指令，value参数存在的时候等价于w指令。	指令直接书写目标地址，是rw指令的简写形式。
R	port	32位方式读取目标端口。	
W	port value32	32位方式写入目标端口，value32参数有效位数最多为32。 32位方式写入目标端口，value32参数有效位数最多为32。	

表 2.5　CPU板卡相关的调试指令

指令字	指令参数	返回内容	返回结果和说明
vercpu	-	CPU板卡硬件版本信息字符串	CPU板卡的FPGA固件程序版本信息。
chkflt	-	FAULT信号	检查当前FAULT总线上的数值。
fltmsk	[mask]		没有参数的时候只是读取旧的Fault mask。附带参数的时候设定新的参数。
chkint	-	INT信号	检查当前INT总线上的数值。
intmsk	[mask]		没有参数的时候只是读取旧的INT Mask。附带参数的时候设定新的参数。

ADC板卡相关的调试指令如下表2.6所示。

DI板卡相关的调试指令如下表2.7所示：

DO板卡相关的调试指令如下表2.8所示：

PWM板卡相关的调试指令

DVR装置的系统控制指令

2.7　总结

本章介绍了电能质量控制装置中的智能控制器和智能控制系统，并结合深圳电网电能质量综合治理研究与工程示范项目的实践结果，介绍了智能电能质量控制的构架和技术创新。

电能质量智能控制器采用了模块化的硬件和软件设计技术，为了满足控制器对多路电力信号的采集、分析、计算和输出控制，硬件配备了FPGA器件进行高效率的信号前端处理。软件系统采用了无操作系统的设计方案，减少系统的管理开销，充分发挥了核心计算处理期间的运算性能。为了满足实时监控和远程调试测试的需求，针对性的设计了高效率的专用网络通信协议，使得系统具备了运行状态的定时传输记录和异常情况下多路信号的持久存储。为了满足远程调试的需求，设计了专用的调试指令集和调试终端，使用者可以通过网络进行远程的精确控制。

表 2.6　ADC板卡相关的调试指令

指令字	指令参数	返回内容	返回结果和说明
veradc	[1|2]	ADC板卡硬件版本信息字符串	检查ADC板卡的FPGA固件程序版本信息。参数为1或者缺省值时，返回第一块ADC板卡的版本信息。参数为2时，返回第二块ADC板卡的版本信息，如果第二块板卡存在的话。
adcrst	-	-	对ADC板卡进行复位操作，时间至少3毫秒。
adcen	[0|1|2]	-	查询或者设定ADC板卡的使能控制。 0 = 不采样。 1 = 内部时钟控制采样频率。 2 = 系统同步时钟控制采样频率。
adcprd	[prd]	-	60MHz分频得到内部采样频率。
adc	channel	-	读取通道的ADC采样原始数值。注意此处数值为16位补码方式表示的短整型数值。
adcmode	[0|1|2]	-	参数缺失，查询当前采样模式。 0=设置为原始采样模式。 1=交流采样模式，结果是自适应去除直流分量以后的结果。 2=低通滤波模式，结果是信号中的直流分量（直流偏置）。

表 2.7　DI板卡相关的调试指令

指令字	指令参数	返回内容	返回结果和说明
verdi		DI板卡硬件版本信息字符串	检查DI板卡上的FPGA固件程序的版本号。
dirst			对DI板卡进行硬件复位。
di	channel		读取当前电平值

表 2.8　DO板卡相关的调试指令

指令字	指令参数	返回内容	返回结果和说明
verdo			检查DO板卡上的FPGA固件程序的版本号。
dorst			对DO板卡进行硬件复位。
dogen	[en]		DO板卡低端32路光耦合信号的输出使能。读取、设置新的使能控制字。
doren	[en]		DO板卡高端33-48路继电器耦合信号的输出使能。读取、设置新的使能控制字。
do	channel [value]	没有[value]项的时候，返回当前输出值	读取或者设定对应通道的输出值。

表 2.9　PWM板卡相关的调试指令

指令字	指令参数	返回内容	返回结果和说明
verpwm	[1|2]		检查PWM板卡上FPGA程序的固件程序版本号。 1=IGBT/H-Bridge通信板卡。 2=SCR晶闸管驱动板卡。
pwmrst			对PWM板卡进行硬件复位，PWM板有两块，依次对它们进行复位操作。
pwmen	[en]		参数不存在时对PWM板卡上的使能寄存器查询。参数存在时，对PWM板卡上的使能寄存器设定新数值。
pwmst	channel [st]		channel 1-18位于第一块PWM板卡，19-36位于第二块板卡。下面关于通道参数设置查询的指令与此相同。 st参数空白的时候查询当前状态，有效时设定新的数值。State含义参见板卡的设计说明文档。
pwmact	channel [act]		act参数空白的时候查询当前状态，有效时设定新的数值。Action含义参见板卡的设计说明文档。
pwmprd	channel [prd]		Prd参数空白的时候查询当前状态，有效时设定新的数值。Prd含义参见板卡的设计说明文档。
pwmld	channel [load]		Load参数空白的时候查询当前状态，有效时设定新的数值。Load含义参见板卡的设计说明文档。
pwmdd	channel [dead]		Dead参数空白的时候查询当前状态，有效时设定新的数值。Dead含义参见板卡的设计说明文档。

表 2.10　PWM板卡相关的调试指令（续表）

指令字	指令参数	返回内容	返回结果和说明
pwmph	channel [phase]		Phase参数空白的时候查询当前状态，有效时设定新的数值。Phase含义参见板卡的设计说明文档。
pwmtx	channel [txdata]		Txdata参数空白的时候查询当前状态，有效时设定新的数值。Txdata含义参见板卡的设计说明文档。
pwmrx	channel		查询当前接收到的MODEM数据RXData含义参见MODEM定义。
pwmin	channel		查询当前PWM INPUT的电平数值。
pwmrxlk	channel		RXData信号是否锁定的指使。
pwmmsk	channel [mask]		查询或者设定通道工作模式的控制字。控制字的说明参见PWM设计文档。
pwmdcth	channel [dcth]		第二个参数缺失时，查询当前直流数据低水位告警阈值。第二个参数存在时，设置新的直流数据低水位告警阈值。只在H-Bridge模块的通信模式下有意义。

表 2.11　DVR装置的系统控制指令

类别	指令字	指令参数	返回内容	返回结果和说明
基础功能	watch	adcch [0|1]		查询和设定DSP系统通过ADC数据完成的中断需要采集缓存的通道号。
	dvrstdelay	[delay]		查询和设置每一次状态发送的时间间隔。参数的单位是1/15秒。
	faststst			触发一次快速状态数据发送过程。每一次状态数据快速发送，会有256个状态包快速发送到上位机，仅仅进行存储，不驱动显示更新。
	alarm	type[0101] src_attr[0]		立刻模拟一次告警事件的上传。 类型请参照告警信息表中的类型定义，十六位宽十六进制数字。 src_attr，告警信息来源和告警信息参数合并编写，三十二位宽。高十六位表示来源，低十六位表示告警事件参数。含义参见告警信息表。
业务控制	dvrbpon	0|1|2|A		电子旁路开关，ABC三相分别或者同时接通。
	dvrbpoff			电子旁路开关，ABC三相分别或者同时接通。
状态查询	dvrst [st]			查询或者强行设置dvr系统状态。
	dvrstmsg			查询装置状态文字形式描述（taskflow）
	ftype			查询当前故障状态字的数值。
	dvrermsg			查询装置错误状态文字形式描述(reason of error)
	sagst			查询SAG信号，同时也是SAG类型编码。
	itemp	index [v]		查询和设置状态第一类整数附加参数的数值
	ftemp	index [v]		查询和设置状态第二类，浮点附加参数的数值

第3章　高效率信号分析技术和电网信号检测

电能质量信号的监测过程同时具有连续性和实时性两个需求，一方面电能质量的信号需要连续处理，另一方面信号发生畸变质量事件发生的时候需要及时完成检测。

以往的利用小波变换的模极大值奇异性进行检测的研究中，直接利用传统的小波分析方法对连续的信号中的窗口数据进行处理，具有计算效率低下的缺点。

本文中提出的针对电能质量连续监测的增量式小波分析方法充分利用了小波变换的结合律特性，针对连续信号处理时历史数据的贡献，增量式的完成电能质量信号的连续监测。

仿真实验表明，本文的算法能够有效的提升计算效率，加速比可以得到260倍以上。

3.1　前言

电能质量信号监测是电能质量管理的基础环节，它同时具有连续性和实时性两个需求：一方面电能质量的信号需要连续处理，另一方面当信号发生畸变的时候需要及时完成检测判断，报告电能质量事件的发生，以驱动后续的控制和管理环节做出相应的驱动动作。电能质量事件中，电压暂降（SAG）故障是最严重的故障之一，对应的SAG信号检测是电能质量管理技术的重要环节。本文提出的增量式小波分析方法就是针对SAG信号的快速可靠检测提出的，目标在于提升计算效率使其更加符合嵌入式的计算环境。以有的研究中，小波分析[1,2]用于电能质量检测[3,4] [5] [6] [7] 的做法中，原理是小波变换模极大值用于突变信号检测。

以上研究中大多没有做出足够的性能优化，没有针对信号的连续性对滑动窗口的数据处理进行改进，使用的快速算法Mallat适用于固定已知长度得数据序列，对于无限长度数据流的处理还可以做出优化。尤其是，当一个采样点更新，造成分析窗口滑动的时候，需要对整个窗口进行重新分析，而实际上这是不必要的。

针对这个问题，本文中提出的增量式小波分析充分利用了小波变换的结合律特性以及模极大值判断过程中数据轮换对称性，当一个采样点更新的时候，可以快速的对小波分析结果进行更新。更进一步，为了防止计算误差的积累，本文还引入了关键窗口的概念，当增量方式计算次数累积到门限阈值的时候，触发一次完整的小波分析计算，作为后面一系列增量式计算的关键基准。仿真实验表明，算法提升的计算效率可以达到260倍以上。

3.2　电能质量信号检测问题和传统的小波分析检测方法

电能质量相关的信号在正常情况下，是持续的工频正弦波。但是，当电压发生变动的时候，又具有时间随机、持续时间短暂，并且伴随着奇异值点、阶跃点等特征，因此其分析方法要求具有快速准确等性能，电能质量信号的分析方法需要能够完整的反应信号在任意时刻的频率特征。小波变换具有良好的时域频域局部化特点，能够克服快速傅里叶变换或者滑动窗口式傅里叶变换的缺点，适合于突变信号和不平稳信号的分析和检测。

小波变换的关键是母小波$\psi(t)$（也称基本小波）的确定，$\psi(t)L^2(R)$，R为实数集，$L^2(R)$为实数域空间，$\psi(t)$的小波变换式为：

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{\frac{1}{2}}\psi(\frac{t-b}{a}) \tag{3-1}$$

式中，a,b R,且a≠0，$\psi_{a,b}(t)$为一个小波序列，a为伸缩因子，b为平移因子。设输入函数为$f(t)$时，则小波变换表达式为：

$$WT_f(a,t) = \frac{1}{\sqrt{a}}\int_R f(t)\psi(\frac{t-b}{a})dt \tag{3-2}$$

Daubechies小波是世界著名的法国小波分析学者Inrid Daubechies构造的小波函数，简写为dbN，N是小波的阶数。小波$\psi(t)$和尺度函数$\Phi(t)$中的支撑区为$(2N-1)$，$\psi(t)$的消失矩为N。db小波数学表达式：

$$p(y) = \sum_{k=0}^{N-1} {C_k}^{N-1+k} y^k$$

式中，${C_k}^{N-1+k}$为二项式的系数，则有:

$|m_0(\omega)|^2 = (\cos^2\frac{\omega}{2})p(\sin^2\frac{\omega}{2})$ 式中，$m_0(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2}}\sum_{k=0}^{2N-1} h_k e^{-jk\omega}$。

Daubechies小波具有以下特点：

- 在时域是有限支撑的，即$\psi(t)$长度有限。
- 在频域$\psi(\omega)$在$\omega = 0$处有N阶零点。
- $\psi(t)$和它的整数位移正交归一，即$\int \psi(t)\psi(t-k)dt = \delta k$。

- 小波函数$\psi(t)$可以由所谓“尺度函数”$\Phi(t)$求出来。尺度函数$\Phi(t)$为低通函数，长度有限，支撑域在$t = 0 \sim (2N - 1)$范围内。

小波变换的实质是信号和小波基的卷积，通过信号在不同小波尺度上投影来获取信号的时频特征，然而使用不同的小波基，就会有不同的时频特性，即小波基都有选择性。

根据小波变换模极大值原理，输入信号的小波变换将在奇异点处出现小波系数模极大值。计算时先选出各尺度下小波变换模极大值，然后根据一定的阈值选出其他极值点，将选出的极值点进行细节分量重构，即可将模极大值与电压信号突变点对应起来，从而确定出电压凹陷的开始时刻。

3.3　增量式小波分析方法的算法原理

利用小波变换模极大值原理，检测出电压暂降故障起始时刻和电压变化幅值，可以达到快速检测电压SAG的目的。对于连续信号，传统的小波分析方法是将信号的一部分构成分析窗口，然后对该窗口内的数据进行小波分析，检测模极大值的变化进而判定是否发生异常。分析窗口永远存储的是最近的一组采样值，当一个新的采样值到来的时候，滑动分析窗口到当前的采样值，然后重新进行小波分析。分析窗口的滑动规律如下图所示：

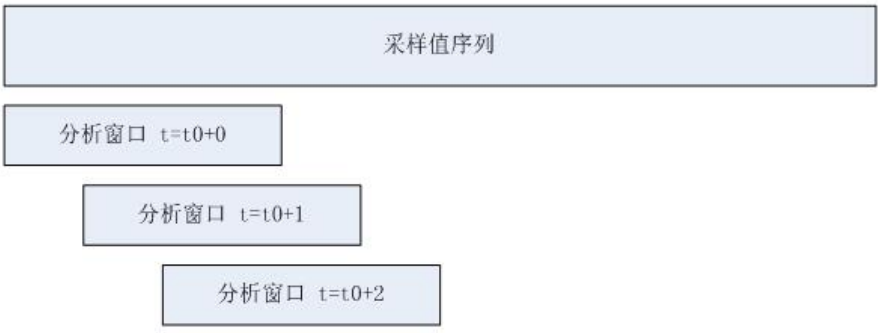

图 3.1　小波分析的滑动窗口

从图3.1可以看出，当分析窗口滑动的时候，实际上只有部分数据发生了更新，根据小波分析的结合律特性，可以利用上一个窗口的结果和两次数据的增量差异快速的完成更新后窗口的小波分析。

3.4　增量式小波分析方法的设计实现

利用上一个窗口的结果和两次数据的增量差异快速的完成更新后窗口的小波分析，增量更新的逻辑示意图如图2所示：

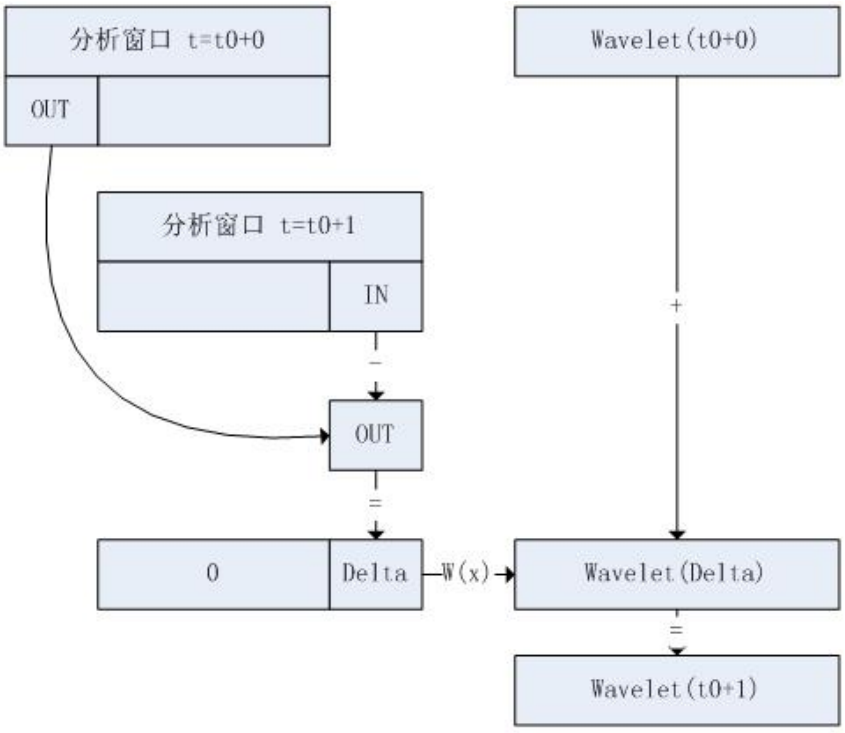

图 3.2　增量式小波计算示意图

增量式小波分析方法利用了分析窗口滑动时有大部分数据重复的特性，对小波分析进行加速的计算方法。如图3.2中所示，当分析窗口发生滑动的时候，数据发生变化的可以理解为IN部分替换OUT部分。于是，增量式分析算法首先计算两次分析窗口中数据的差异Delta，用0填充扩展成一个完整的分析窗口，计算得到小波分析结果，然后在原有小波分析的结果上叠加，即可得到新的分析结果。由于增量部分扩展出来的分析窗口大部分数据是0，所以可以极大的简化分析计算压力，进而加速整个滑动窗口分析的效率。

3.5　增量式小波分析方法的性能分析

特别的，当Delta部分的宽度为1的时候，就构成了快速增量式小波分析算法，可以对连续信号进行滑动窗口式分析。理论分析计算量可知，当窗口宽度为n，小波分析支撑函数宽度为m的时候，完整的一次窗口分析需要进行的计算量是n*m*2次乘法和加法计算，而一次增量式计算仅需要m次乘法和m*2次加法即可完成。由于加法的速度远大于乘法，忽略加法操作对计算的影响可以估算得到增量式计算的加速比约等于n。常见的配置中，滑动窗口的宽度为128时，加速比可以得到100；宽度为256时，加速比可以达到200。实际上算法的加速度效果与实现的效率有关系，加速效果会有适度的缩减。

3.6　仿真实验和结果分析

仿真实验由C语言在VC6环境下进行。试验中，电网信号的采样频率选择为10KHz，每一个工频周期20ms内的采样点个数为200；滑动窗口的宽度n设定为512，小波分析采用db1小波分析，支撑函数宽度m为2。测试数据的长度设定为2000个点，如下图3.3所示。

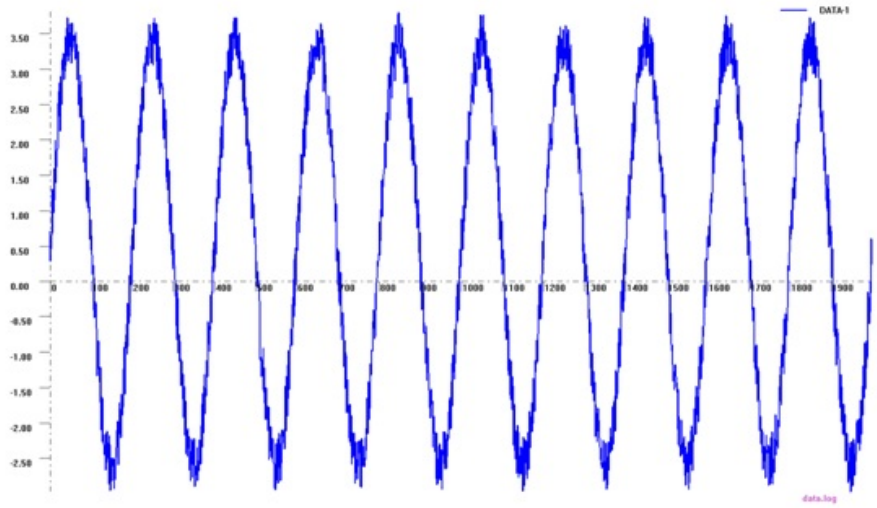

图 3.3　增量式小波分析数据源

滑动窗口经过db1小波分析以后的结果如下图3.4所示：

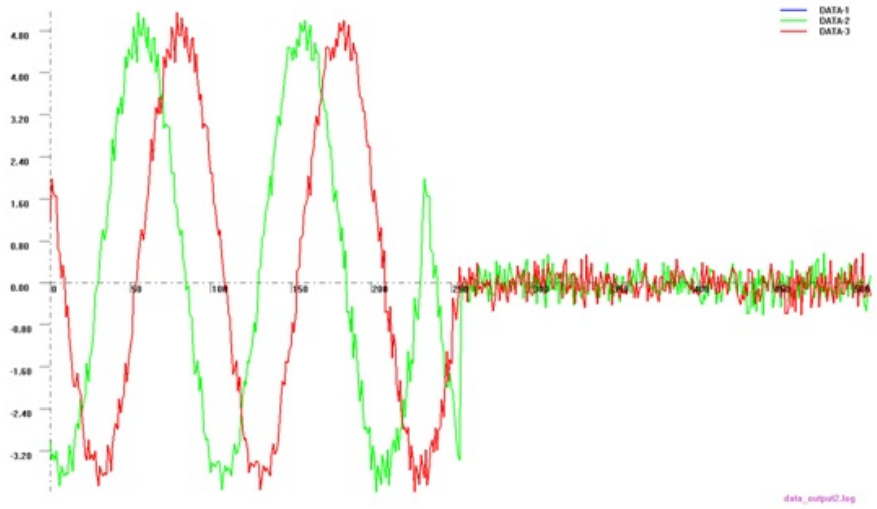

图 3.4　增量式小波分析结果

上图3.4中，绿色曲线为增量式小波分析的中间结果，经过平移变换以后得到的红色曲线为最后一个滑动分析窗口的分析结果。蓝色曲线为最后一个滑动窗口的直接分析结果，与红色曲线完全吻合，说明增量式分析算法能够产生正确的分

析结果。

使用Windows系统函数$clock()$记录运行时间，得到的结果如下表所示：

表 3.1　数据分析运行时间记录统计

编号	运行次数	改进前运行时间(s)	改进后运行时间(s)	加速比例(%)
1	1000	20.760	0.077	269.610
2	2000	41.878	0.158	265.051
3	3000	62.898	0.240	262.075
4	4000	83.972	0.315	266.578
5	5000	105.529	0.395	267.162
6	6000	126.519	0.473	267.482
7	7000	147.373	0.552	266.980
8	8000	168.205	0.628	267.842
9	9000	188.325	0.703	267.888
10	10000	209.690	0.785	267.121

经过10轮测试，增量式算法能够得到的加速比在上表的最右侧给出，平均水平在260倍以上。

3.7　结论和展望

利用小波变换模极大值原理，即奇异信号的小波变换将在奇异点处出现小波系数模极大值，可以对电能质量信号进行异常检测。文中提出的方法通过对电网信号的持续采样和增量式的小波变换，检测小波系数模的局部极大值点可确定短期扰动信号发生的时刻。通过增量式计算算法可以明显降低数据处理过程中的计算压力，实验证明算法的加速比在260倍以上。

第4章　能源互联网中基于FPGA的远程自主控制技术

能源互联网中，能源路由器节点需要以分布式的方案进行部署，工作的过程中必须达到无人值守的条件。一方面，由于能源路由器的工作场合可能地处偏远，不适宜人类工作人员值守；另一方面，实际工作场景中一旦出现需要解决的故障时，必须在非常快的时间内完成控制动作，这些操作也远超过人类操作所能够达到的响应速度。所以，能源路由器就需要具备高度的智能化自主运行，能够自适应的完成高效率的信号检测，信息处理以及自我防护能力。

针对以上这些需求，文中利用FPGA计算技术所独有的高效率和高可靠性，依次介绍了基于FPGA计算的程序自我保护技术，以及基于FPGA计算的可以动态编程信号检测以及信息处理技术。

4.1　序言

FPGA（Field－Programmable Gate Array），即现场可编程门阵列，它是在PAL、GAL、CPLD等可编程器件的基础上进一步发展的产物。它是作为专用集成电路（ASIC）领域中的一种半定制电路而出现的，既解决了定制电路的不足，又能够克服原有可编程器件门电路数有限的缺点。 FPGA器件在系统集成的设计中，越来越起到关键的作用。

以硬件描述语言（Verilog或VHDL）所完成的电路设计，可以经过简单的综合与布局，快速的烧录至 FPGA 上进行测试，已经成为现代IC设计验证以及电子系统设计的技术主流。这些可编辑元件可以被用来实现一些基本的逻辑门电路（比如AND、OR、XOR、NOT）或者更复杂一些的组合功能比如解码器或数学方程式。在大多数的FPGA里面，这些可编辑的元件里也包含记忆元件例如触发器（Flip－flop）或者其他更加完整的记忆块。系统设计师可以根据需要通过可编辑的连接把FPGA内部的逻辑块连接起来，就好像一个电路试验板被放在了一个芯片里。一个出厂后的成品FPGA的逻辑块和连接可以按照设计者而改变，所以FPGA可以完成所需要的逻辑功能。 FPGA一般来说比ASIC（专用集成电路）的速度要慢，实现同样的功能比ASIC电路面积要大。但是他们也有很多的优点比如可以快速成品，可以被修改来改正程序中的错误和更便宜的造价。厂商也可能会提供便宜的但是编辑能力差的FPGA。因为这些芯片有比较差的可编辑能力，所以这些设计的开发是在普通的FPGA上完成的，然后将设计转移到一个类似于ASIC的芯片上。另外一种方法是用CPLD（Complex Programmable Logic Device，

复杂可编程逻辑器件)。

FPGA的开发相对于传统PC、单片机的开发有很大不同。FPGA以并行运算为主，以硬件描述语言来实现；相比于PC或单片机（无论是冯诺依曼结构还是哈佛结构）的顺序操作有很大区别，也造成了FPGA开发入门较难。 FPGA开发需要从顶层设计、模块分层、逻辑实现、软硬件调试等多方面着手。

4.2　FPGA计算技术实现分布式程序死锁保护

电力系统装置中的智能控制器，一般由单片机作为控制核心，通过在其上运行的控制软件对装置系统中的电能设备进行智能化控制。电力系统装置处于电源系统与载荷系统的衔接处，当发生意外的情况下，对两侧系统进行隔离保护的能力十分关键。

电力装置的运行过程中，物理环境和电磁环境非常复杂条件也十分苛刻，这些外来因素可能会导致智能控制装置的核心处理器，例如DSP芯片，停止正常运行。同时，DSP上软件编写或者调试过程中，难免会出现逻辑错误，导致核心处理器进入死循环状态。这些情况下，DSP芯片丧失了正常控制和判断的运算能力，会导致保护动作的失效，将整个电力控制系统置于危险之中。因此，有必要采取相应的设计，对这类事故发生的时候，自动的执行保护动作。

调查表明，以往的DSP程序死锁保护动作仅仅存在与DSP内部，即使用DSP芯片内部的看门狗模块完成运行过程的保护。基本的技术方案是DSP上运行的程序定期的对看门狗模块进行驱动更新设置。正常运行的情况下，看门狗模块能够定期的被DSP控制软件更新从而，保持在正常的工作状态。当意外发生的时候，DSP程序出现死锁，此时看门狗模块的设置将得不到定期的更新。一段时间以后，看门狗的延时控制逻辑将触发一个超时信号，也就是软件保护信号。软件保护信号由于是DSP内部产生内部使用，所以其保护动作局限在DSP芯片内部，所能做的保护动作也基本上只能够驱动DSP芯片进行重新启动。

当前大功率电力装置的控制系统主流设计中，采样和输出模块通常采用与主控芯片DSP分立设计的方案，即输入和输出功能部署在外部的板卡甚至是远端设备上，以往的基于DSP芯片内部看门狗的设计方案不能够保证处理单元发生异常的时候，及时通知到各个输入输出设备并触发对应的保护动作。而以往的保护措施大多集中在运行参数超限超阈值性质，而对于模拟输出量的连续控制机制中，由于需要控制软件不间断的输出控制信号，这种应用场景下，就必须采用独立前置的程序死锁保护机制，防止输出信号的错误中断。同样的，离散控制（开关量控制）外设中，也需要保证主控模块的连续运行反向检测，当主控模块由于各

种原因发生故障时，控制输出外设应该自主的完成保护动作。由此可知，单纯通过DSP芯片上的看门狗保护模块进行保护动作，方案的可靠性和鲁棒性得不到足够保证。

4.2.1　FPGA上部署的独立于DSP的运行保护逻辑

本专利技术开发了部署在输入输出模块上FPGA器件的运算能力，通过FPGA上独立运行的保护功能模块，以并行的方式对DSP芯片的运行状态进行反向监测，并且当DSP运行状态异常的时候，能够独立的驱动相关电气设备完成电力系统装置的保护。

按照FPGA器件的位置不同，可以大致分为三种实现方式：紧密耦合方式下FPGA芯片与DSP芯片位于同一个电路板卡；松散耦合方式下FPGA芯片与DSP位于不同的电路板卡，并且通过板卡之间的总线进行信息的交互；远程耦合方式下，FPGA芯片作为前置（远程）装置的控制核心，与DSP通过长距离的通信手段例如串行通信进行信息交换。

4.2.2　分布式运行死锁保护技术原理

电力系统智能控制装置中的DSP由于外部环境和软件程序的原因会陷入死锁状态，单纯依靠DSP自身的看门狗模块并不能稳妥的完成异常情况下的电路保护。本专利的设计思想是将FPGA芯片作为控制器的辅助处理，使其具备自主的逻辑和信息处理能力，从而完成更加可靠的保护动作。本专利的体系结构中，FPGA与DSP一起通过并行处理的模式，协同一致完成电力装置的控制，而不是单纯的作为外设提供数据或者接收指令。

技术方案中，电力系统智能控制装置中，在分立的信号输入模块或者控制输出模块中部署FPGA器件，并且在FPGA器件上根据需要配置DSP之外的看门狗模块。当DSP的运行过程中由于各种原因出现程序死锁的时候，部署在FPGA上的硬件保护逻辑将自主的生成保护动作驱动信号，完成电路的状态切换动作。

图 4.1 是可动态编程信号检测系统的体系构架。如上图所示，FPGA器件上的程序死锁保护功能模块独立于DSP信号处理单元，对DSP的运行状态进行监测。正常情况下DSP上运行的控制程序会定期的更新FPGA硬件看门狗的控制计数器，以通知FPGA上的程序死锁保护模块自身的运行状态正常。

当异常情况发生的时候，DSP由于发生死锁，定时更新机制会被中断。FPGA器件上的死锁保护机制在预定的时间内如果没有获得更新，就可以产生DSP死锁的判断，进而发出对应的控制信号，驱动附属在控制器上的保护器件

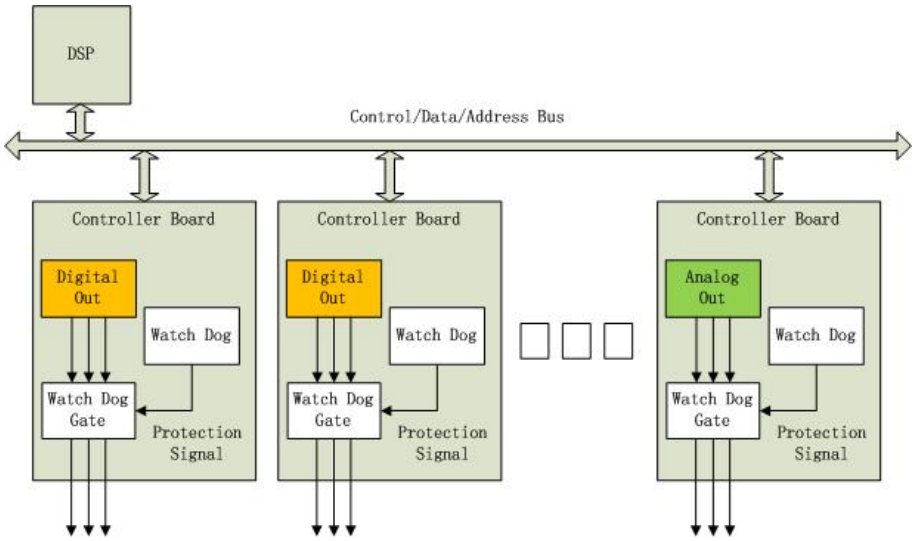

图 4.1　可动态编程信号检测系统的体系构架

进行相应的保护动作。

利用FPGA器件的运算和逻辑判断能力，通过设置在FPGA上的死锁保护器件对DSP的运行状态进行实时监控。当DSP的硬件环境或者软件程序发生异常情况的时候，自主的驱动外围设备进行保护动作。由于FPGA器件独立于DSP芯片自主的运行，这种并行的检测和动作机制可以提高电力系统控制装置的可靠性和鲁棒性。

4.2.3　分布式运行死锁保护的实现

基于FPGA计算的嵌入式系统程序死锁保护技术的具体技术实施分为几个环节分别介绍。

1) 硬件构架

如图4.1 所示，FPGA器件上的程序死锁保护功能模块独立于DSP信号处理单元，对DSP的运行状态进行监测。正常情况下DSP上运行的控制程序会定期的更新FPGA硬件看门狗的控制计数器，以通知FPGA上的程序死锁保护模块自身的运行状态正常。异常情况下，DSP发生死锁以后程序不再运行的时候，FPGA上的死锁保护机制在预定的时间内没有获得更新，产生对应的控制信号，驱动附属在控制器上的保护器件进行相应的保护动作。

2) 固件程序设计

图 4.2 是FPGA系统程序死锁保护模块的固件程序设计原理图。 FPGA固件程序设计如上图4.2中所示，输入的时钟信号经过分频处理以后，变成1MHz的计时时钟脉冲，目标是将硬件保护电路的时间参数定为1微秒。硬件保护电路的核心是一个可复位的减计数器。当RST信号有效时，计数寄存器使用输入参数N作为初始

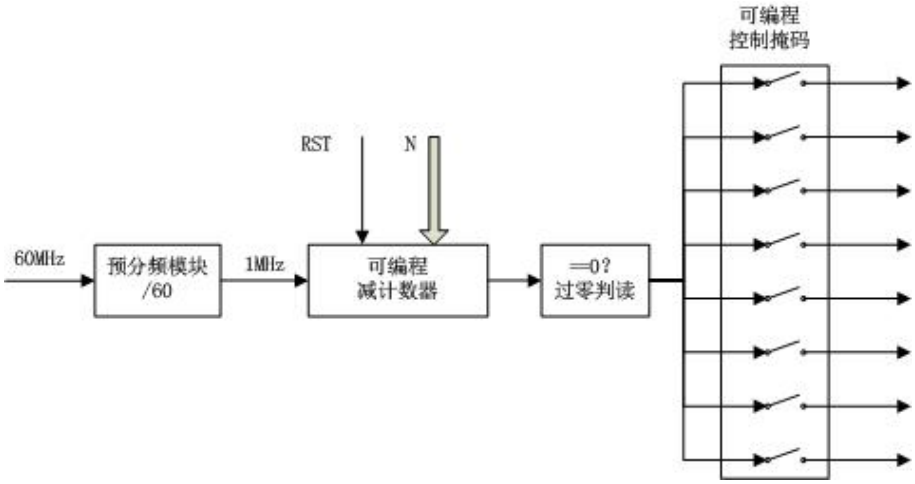

图 4.2　FPGA系统程序死锁保护模块的固件程序设计原理图

值设定。正常工作时，RST消失以后，计数寄存器每个计数周期完成一次递减操作，直到为零。计数寄存器的数值为零的时候，不再自动递减，而是保持这个状态直到下一次复位操作。系统保护电路的输出由判决运算“==0”的结果决定，然后通过输出控制的多路选择以后，将保护控制信号发送到对应的外部动作设备。输出控制采用可编程的开关器件进行通断（使能）控制，满足动态状态切换的要求。

3) 软件设计和应用流程

利用FPGA计算技术进行嵌入式系统程序死锁保护的应用软件的使用应该按照如下的逻辑进行编写：

- 初始化：关闭或者清除$FPGA-WD$相关的输出通道设置。
- 设定初始计数值，按照延时保护的要求，单位为微秒。
- 打开（使能）对应的输出通道。
- 定时对初始计数器进行复位操作。

程序运行结束或者需要中断调试的时候，需要按照如下的逻辑进行编写：

- 关闭对应的输出通道，防止保护系统的误动作。
- 程序停止或者退出。

4.2.4　硬件电路完成程序死锁保护技术的实际应用

在深圳供电局电能质量综合治理示范工程项目中，本方法完成了实际的部署和功能测试。在主控板上部署的系统保护模块能够在手动模拟死锁的情况下，及时迅速的绕过DSP器件，通过直接的控制电路信号发出数字控制量，以及关闭模拟量的调制输出。响应时间由软件系统中设定的检测时长参数确定。死锁判断完成以后，直接的数字逻辑能够在亚微秒级进行相应的动作，形成控制量的输出。

实际实验的结果表明，这种系统设计的方法，可以完成系统死锁的硬件保护，为整体装置在开发、测试乃至实地部署以后的可靠运行提供有力的支撑。

4.3　基于FPGA计算的可动态编程信号检测技术

电力系统装置中的智能控制器，一般由单片机作为控制核心，通过在其上运行的控制软件对装置系统中的电能设备进行智能化控制。电力系统的信号输入是多种多样的，中间包括前置采样系统或者需要电磁隔离的高压输出设备反馈。这些信号的输入都需要进行模式匹配的检测来判断采样系统的信号输入或者输出系统的反馈信息是否正常。

4.3.1　基于FPGA完成逻辑信号处理

由于信号判读的逻辑灵活多变，甚至会随着系统装置的工作状态的改变而改变，所以已有的设计中信号判读的逻辑大多使用DSP芯片上的软件程序实现。这种做法的弊端一是占用DSP芯片的计算时间计算资源，妨碍智能控制算法的复杂实现；二是影响信号的响应速度，尤其是当信号报告故障需要紧急处理的情况下，软件程序由于其计算判读和控制任务的物理单线程特性，会产生非常可观的时间延迟，严重的情况下甚至会延误紧急信号的及时处理。为了提高响应速度，一部分的设计中采用FPGA硬件辅助实现。FPGA器件由于其独特的硬件编程能力，能够在响应速度和可编程灵活性之间寻找更加合理的平衡点，越来越多的引入到智能控制装置的设计中。但是以往的硬件检测方法中，部署到FPGA上的检测电路对信号进行模式检测是预先设定的，缺乏动态编程的灵活控制，限制了FPGA器件能力的充分发挥。由此，本专利在硬件可编程的基础上，更进一步的开发了运行过程中动态可编程控制能力，以实现灵活的信号模式检测。

4.3.2　可动态编程信号检测原理

本专利技术利用FPGA器件的运算能力，通过超细粒度信号处理单元和动态控制微指令的方式，驱动检测逻辑，以并行的方式进行信号模式检测。 FPGA上可以根据信号的并发程度，部署多个超细粒度信号处理单元，以并行的方式对多个信号来源进行模式检测。多路信号并发机制，可以使得系统处理速度得到显著提升。动态可编程信号检测技术将信号模式检测的逻辑移植到FPGA上以硬件计算的方式进行，可以显著节省DSP芯片的计算资源，提升智能控制系统的响应速度，进而提升整体控制装置的可靠性。信号检测单元可动态编程，在运行速度提高的

同时，使得信号处理系统具备强大的灵活性。当信号处理逻辑改变或者升级的时候，可以通过动态的部署处理逻辑完成。系统的可维护性可升级性得到改善。

4.3.3　可动态编程信号检测技术实现

电力系统智能控制装置中，通常需要对采集来的信号进行复杂的逻辑处理。本专利解决了多路信号同时处理的速度问题，并且通过微处理单元的可编程特性，保证信号处理逻辑改进升级需求的高效率实现。

电力系统智能控制装置中，在信号输入模块中部署FPGA器件，并且在FPGA器件上根据需要同时处理的信号来源数量，部署等量的前端信号处理单元。

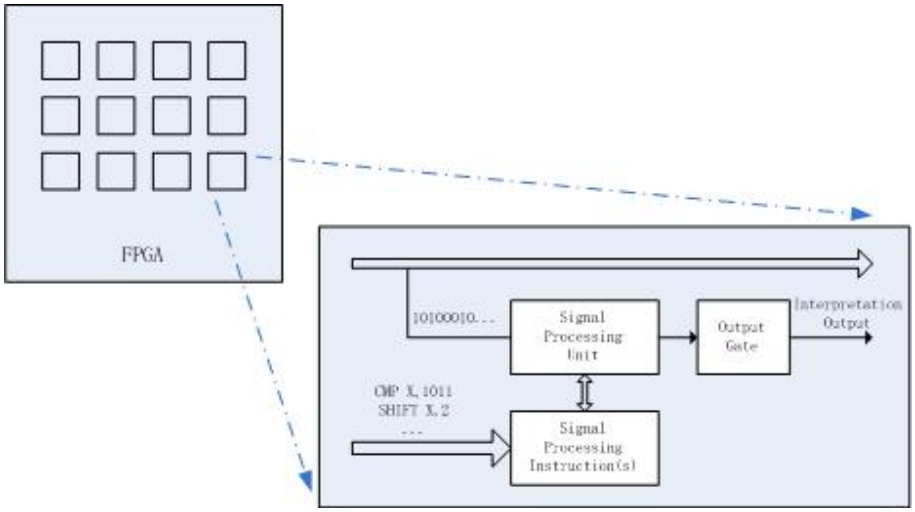

图 4.3　可动态编程信号检测系统的体系构架

图4.3是可动态编程信号检测系统的体系构架，如图中所示，FPGA器件上的信号处理单元并行的对输入信号进行处理，处理逻辑通过控制总线实时编程。智能控制装置的中心控制软件，根据当前装置运行状态或者来源信号的特性，将信号检测和处理逻辑编写成对应的信号处理微指令，下发部署到并行信号处理单元上执行。并行的信号处理单元之间的控制过程相互独立，检测逻辑可以互不干扰，对信号进行不同模式的检测。

基于FPGA计算的可动态编程信号检测的具体技术实施分为四个环节分别介绍。

1) 硬件构架

电力系统智能控制装置中，信号信息采集模块中部署一个FPGA芯片进行前端处理，然后结果传送给DSP进行逻辑处理。信号信息采集相关的硬件结构可以

入下图表示。

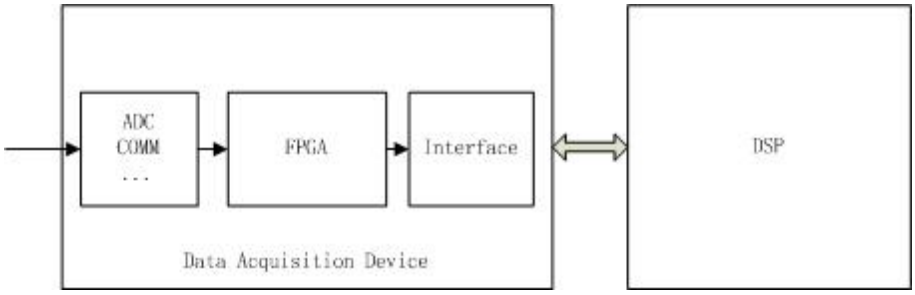

图 4.4　信号采集（前端处理）系统的硬件构架

图4.4是信号采集（前端处理）系统的硬件构架。如图中所示，待处理的信号通过采样模数转换，或者通信器件进入到数据采集模块以后，先经过FPGA器件的缓存和处理以后，利用专用接口与DSP完成通信，将信号及其检测结果传递给DSP进行进一步的逻辑处理。

2) 固件程序设计

FPGA器件上的固件程序中，部署前述的分布式信号处理单元，信号处理单元包含信号缓存，处理单元状态缓存，处理单元指令存储，处理单元指令执行以及处理单元输出控制等主要模块。信号处理单元的结构如图4.5所示：

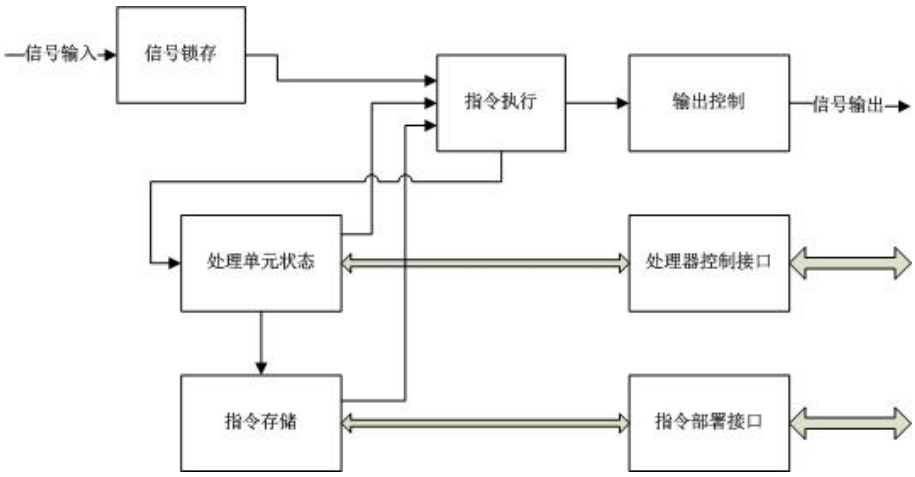

图 4.5　可动态编程信号处理单元逻辑结构

如图4.5中所示，信号处理单元的逻辑流程从信号的输入锁存开始。处理单元的状态和控制模块根据当前的信号处理状态，从指令存储模块中取出对应的处理指令，发送到指令执行模块。指令执行模块根据当前的信号输入、处理单元状态字以及当前需要执行的指令，运算得到新的目标状态以及输出信号。新的目标状态发送到处理单元的状态模块对当前的状态进行更新；而输出信号经过输出使能

控制以后，上行传送到DSP进行高级别的控制。

处理器控制接口建立DSP与处理单元状态存储模块的通信链路，使DSP能够对处理单元的状态进行查询和控制。指令部署接口建立DSP与处理单元指令存储模块的通信链路，使得DSP能够完成处理微指令的设置和查询。

3) 软件设计和应用流程

信号处理单元与DSP通信模块的驱动在DSP程序控制过程中映射为一组寄存器的读写操作。以某型号信号处理单元的寄存器映射为例，每一个信号处理单元的地址映射如表4.1所示：

表 4.1　信号处理单元的地址映射

基地址偏移量	名称	宽度（位）	读写模式	备注说明
0x0	STATE	16	RW	信号处理单元的状态查询与设置。
0x1	ENABLE	1	RW	信号处理单元的输出使能。
0x2	OUTPUT	1	R	信号处理单元的输出。
0x3-0x7	-	-	-	保留不用。
0x8-0xF	INSTRUCTION	16*8	RW	处理指令存储区，一共可以存储8条指令，每条指令由16位宽度。

应用软件的编写应该遵循以下伪算法1表示的逻辑：

Algorithm 1 可编程信号处理模块的应用逻辑

```
1: begin
2: disenable_output();
3: reset_to_locked_state();
4: deploy_instructions();
5: verify_instructions();
6: reset_to_running_state();
7: enable_output();
8: end
```

4.3.4　实际应用以及效果分析

在深圳电网电能质量综合治理研究与工程示范项目中，电能质量控制器就采用了本章中提出的方法，用于数字模式的信号前端处理。

需要数字式信号前端处理的场合有三个，都是检测光纤通信数据内容的合理性。具体来说是：光纤通信信号的存在和同步锁定判断，光纤通信信号中标志位的判断，以及通信内容中二进制数值的判断。在该工程示范项目中，电能功率器件是与控制器进行了电子隔离的高压设备，与控制器的信息交换采用了光纤通信的手段。功率器件的一共有18路，他们的工作状态和工作参数判定如果采用软件实现，将耗费大量的计算时间以至于影响其他功能的设计。因此，系统的设计中，将这一批信号的解读和判断算法进行了改写，并移植到FPGA器件上以并行的方式处理，为计算核心 DSP进行更高层的逻辑控制算法程序设计节省了大量的计算时间资源，减轻了软件工程师的劳动强度和设计压力。

4.4　总结

FPGA(Field Programable Gate Array，现场可编程门阵列)器件由于具有可编程的能力，已经逐渐成为电子系统设计的必备器件。通过FPGA器件完成数字信号的运算和处理，可以显著提升整体装置的信号处理能力。FPGA完成高性能计算也已经成为计算机体系结构研究领域中的热点方向。本文中，通过设置控制微指令寄存器的方式驱动超细粒度信号处理单元，进行信号模式检测，完成数值判读等数字逻辑操作。由于具有并行性和可编程性，文中的方法可以提高信号输入处理检测的速度，并且具有可动态升级的巨大灵活性。

第5章　电能质量控制器中基于FPGA的前端模拟数据处理

电力系统的智能控制中，需要对离散采集得到的电力信号做出数字分析才能够用于后续的智能控制策略。以往的系统中大多通过软件方法在控制器的计算核心完成数字分析，随着智能控制的信号来源数量增加，计算量的压力会随之增加，对控制装置的器件选型系统设计和成本控制带来巨大的压力。本文利用FPGA 计算的大规模并行处理能力，将电力信号的分析算法进行改进，并且转移到采样模块并通过FPGA硬件完成计算。仿真和实验结果表明，采用FPGA计算可以提高信号处理的效率，降低控制核心的性能需求。

5.1　序言

随着能源互联网的研究发展，相关的电力控制装置中的智能化程度越来越高，与此同时对电力信号进行计算处理的压力越来越大。例如，电力信号的有效值计算就是一个典型的信号处理需求。在电力系统状态监测中，电压与电流等交流信号的精确测量起到关键的作用，这一过程面临两个难点问题：一是在电力系统交流采样中，采样周期与信号周期的不同步，导致交流信号真有效值测量误差难以消除；二是常见的应用场景中，需要对多路的电力信号同时完成数字化计算处理，这会给控制器的核心计算器件，一般为嵌入式的DSP等计算能力较为薄弱的运算器件，带来巨大的设计压力。

为了解决处理周期与信号周期的匹配问题，文章[8]采用软件方法使得采样周期与信号周期完成同步，根据真有效值的定义推导出一种新的测量交流信号真有效值的计算公式。文中对过零点的检测和采样周期的估计进行了改进，使得周期之间的匹配更加精准。而[9]的目标同样定位到采样周期的同步上，但是利用了硬件方法完成采样周期的同步判断和计算。文献[10]为了克服离散系统中交流信号和采样系统的频率匹配问题，则通过自适应的调整分析窗口，使得每一个分析窗口都尽可能的接近一个交流信号周期，进而减少系统误差。

采取回避策略的方法，典型的研究成果中[11]通过分析RMS计算的过程认为利用快速傅里叶变换的方法可以完成真有效值的计算，而不必关心采样周期不匹配带来的负面影响。实验结果证明了方法的可行性，计算精度也有所提升，但是该方法由于使用了大量的计算，并不能完美的应用于嵌入式计算器件上，尤其是当多路信号需要同时处理的时候，算法的计算压力难以得到承担。文献[12]通过对样本数据逐点平方以后依据信号的最低频率分量和计算精度要求设计一个数字式低

通滤波器对平方以后的样本进行滤波处理，等价的进行平均计算，然后一次开方计算获得信号的真有效值。该方法巧妙的回避了测量周期与实际信号的周期不匹配的问题，提升了算法的使用空间。还有一类不采用算法解决的方案，[13]利用了已经成熟的电平转换芯片设计了扩展频谱能力的有效值采样系统，能够处理直流到2KHz交流的信号有效值，这种工程应用不具有良好的扩展性。

利用FPGA器件的可重构能力，将计算任务从传统的冯氏结构计算部件迁移到FPGA器件以硬联逻辑方式并行执行已获得性能改善，是可重构计算研究领域里面已经公认的事实。综述文献[14]中，Russell总结了当时可以观察到的可重构计算技术对于数字信号处理带来的平衡优势，在设计难度和运行速率上可以寻求更加合理的平衡点，因为可重构计算在当时就在多个方面例如功耗造价生命周期以及可维护性上体现出了足够的竞争优势。在国内的研究中，文献[15]实现的系统中对FPGA的应用停留在单片机与AD采样期间的接口水平上，没有充分利用FPGA能够提供的并行计算能力。外文文献中，Song[16]认为传统的冯氏结构计算机在处理大规模数据的表现出低效率，原因在于运算过程和计算机里决定了性能优化的上限。利用可重构计算技术将此类计算进行时间并行化和空间并行化，是解决这一问题的极具前景的研究方向。以FFT为例，文章提出了一种粗粒度的可重构计算设计平台CTaiji，能够有效的建立对问题的描述，对运算过程的改写和实现。已有的研究中，文献[17]的研究中利用可重构器件以并行方式完成前束范式计算，通过高效率的数据流模型来实现并行度和可扩展性。文献[18]利用FPGA器件中的可重构框架实现了多种数字滤波器的运算核心，FIR、FFT、 IFFT、2D-DCT以及2D-IDCT。针对未来SOC多媒体应用环境，文献[19]提出了新兴的离散小波分析处理结构，满足了多样化的计算任务需求。文献[20]中使用FPGA实现了稀疏矩阵的运算，用于电力传输系统智能控制中的运算效率提升，移植以后达到了至少两个数量级的性能提升：一个数量级的主频降低，同时一个数量级的速度提升。实时嵌入式系统设计中，采用了模型驱动的设计思路，对于传统的算法（运算过程）驱动的设计来说，更加便捷的配合设计的更新和改进升级。对于实时系统来说，如果正在执行某项关键运算，则不可以全部停下来借助人工方式完成可重构系统的升级，需要动态可重构技术的支持。文献[21]中的设计采用了中间件的方法，完成模型设计到真实电路实现的自动化转换，有效的降低了设计成本。容错控制系统一般包含正常控制逻辑，故障检测诊断和决策系统，重构机制以及重构控制器。文献[22]提出系统设计方法，完成分布式正常控制逻辑的设计，引入了基因算法对正常控制逻辑的改进和优化。把正常控制逻辑与故障处理逻辑分立出来，以单独的不同模块进行实现，有利于提高系统的鲁棒性，降低两种不同逻辑流程之间的

耦合程度。

嵌入式系统，由于核心计算期间的能力受到体积造价以及能源供给等等限制，对外置式可重构的辅助计算技术提出了更加明确的要求。已发表的文献中，嵌入式计算体系与可重构器件相配合完成高性能计算的设计也已经充分证明了技术路线的可行性。文献[23]中实现了可重构运算单元，可以作为协处理单元或者并行数学运算单元与通用的DSP处理器相配合使用。可重构的单元可以支持3种数据类型，22种数学或者逻辑运算，测试结果表现出了优秀的加速比。文献[24]认为向量相似性矩阵求解过程是数据挖掘技术中一项常见的数学运算内容，该文通过移植的方法将运算迁移到可重构硬件中执行，适应了嵌入式系统中软硬件资源的局限性。实验结果是激动人心的，证明了可重构计算技术的用于提升计算性能所能够带来的诱人前景。在辅助设计相关的技术研究中，[25]指出程序语言到执行指令序列之间的编译转换过程，需要针对性的为了嵌入式系统中可重构资源进行优化，不同于通用的编译技术，一些专门特定的优化方法需要研究人员的注意：浮点数运算通过定点小数运算的实现；数据复用扩展复制，数据存储映像的定制化操作；数据通路的优化数据副本。编译器需要对可重构资源进行充分理解，在编译过程中构建对应的优化调度模型。

综上所述，可重构器件对于提升嵌入式系统计算性能计算效率的提升具有可信可行的优势，但是相关的针对性算法中还缺乏有效值快速计算方法采用专用的数字式滤波器对信号进行处理的专门研究。本文通过有效值计算方法的本质分析，设计了全新的算法完成原始信号到有效值的直接映射，避免了累加求和以及求平方根的计算。该算法可以通过软件实现降低控制器的计算压力，也可以通过FPGA硬件实现将计算压力完全转移到DSP之外。

5.2　电力信号有效值计算方法问题在嵌入式控制系统中实时处理

交流有效值的定义为一段时间内被测量信号的方均根，原始的计算公式为(5-1)。

$$U_{RMS}=\sqrt{\frac{1}{T}\int_{0}^{T}v_{(t)}^{2}dt} \tag{5-1}$$

公式(5-1)中，$v_{(t)}$为待测量的交流信号，T是交流信号的周期。通常这种有效值被称为真有效值，有时也称为方均根值。

对于离散的数字化控制系统来说，这一计算一般表示为公式(5-2)。

$$U_{RMS}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{k=1}^{n}v_{(k)}^{2}} \tag{5-2}$$

公式(5-2)中，n是每一个信号周期中完成的采样点数，$v_{(k)}$是位于第k个位置的采样值。当控制系统的采样频率为6.4KHz 的时候，每一个正常的工频信号周期20ms中采样点的个数是128。那么对于任意一路信号，每一次完整的有效值计算需要128次乘法，127次加法，以及1次除法和1次开平方运算。当需要处理的信号路数随着系统复杂程度的提升而增长的时候，这种直接计算的方法很快就会遇到计算能力的瓶颈约束而失去可用性。

5.2.1　利用FPGA实现大规模并行计算电力信号有效值

针对原始算法的计算量大的缺点，借鉴文献[11,12]中对信号进行数学分析，以间接方式获得有效值的方法，本文提出了取绝对值然后进行低通滤波，最后通过映射关系获得有效值的方法，并且设计了适合于在FPGA硬件上实现的计算方法。

5.2.1.1　对信号取绝对值然后进行低通滤波

由于正常的电力信号是标准工频50Hz的正弦波，那么取绝对值然后进行低通滤波处理以后，结果数值与信号的峰值之间存在确定的换算关系。公式(5-3)表明信号取绝对值以后再经过低通滤波算法得到的结果与信号峰值U_M之间的关系。

$$LPF(|v|)=\frac{1}{T}\int_{0}^{T}|v_{(t)}|\,dt \tag{5-3}$$

公式(5-3)中T是电力信号的周期，$v_{(t)}$是t时刻的采样值。由于

$$\frac{1}{T}\int_{0}^{T}|x_{(t)}|\,dt=\frac{1}{\pi}\int_{0}^{\pi}x_{(\theta)}d\theta=\frac{1}{\pi}\int_{0}^{\pi}U_M\sin(\theta)d\theta \tag{5-4}$$

并且

$$\frac{1}{\pi}\int_{0}^{\pi}U_M\sin(\theta)d\theta=\frac{2}{\pi}U_M \tag{5-5}$$

所以

$$LPF(|x|) = \frac{2}{\pi}U_M \tag{5-6}$$

上面公式中U_M为信号的峰值，$x_{(\theta)}$为以相角为参数的时候，相位角θ处所对应的采样值。

与此同时，正弦信号的有效值U_E与信号峰值U_M之间的关系公式(5-7)表明。

$$U_E = \frac{\sqrt{2}}{2}U_M \tag{5-7}$$

结合公式(5-3)和公式(5-7)可以得到有效值U_E与低通滤波结果$LPF(x)$的关系如公式5-8

$$U_E = \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot LPF(x) \tag{5-8}$$

5.2.1.2　有效值快速计算方法的迭代公式

由于公式(5-8)的计算公式涉及到浮点数计算，不适合在FPGA硬件上直接部署，所以需要进行转换，使用定点小数计算的形式完成在FPGA上的实现。

首先，改写公式(5-8)为迭代形式的数字滤波公式。

$$U_E^{(n)} = (1-\alpha)U_E^{(n-1)} + \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \alpha \cdot x^{(n)} \tag{5-9}$$

上式中，上标(n)表示当前迭代步骤，α为低通滤波的滤波系数，当目标低通滤波器的截止频率为f的时候，α可以由下式决定。

$$\alpha = 2\pi \cdot f \cdot \Delta t \tag{5-10}$$

其中Δt为控制采样系统的控制周期。

令

$$\begin{aligned} K_1 &= 1-\alpha \\ K_2 &= \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \alpha \end{aligned} \tag{5-11}$$

则信号处理公式可见简化为：

$$U_E^{(n)} = K_1 U_E^{(n-1)} + K_2 x^{(n)} \tag{5-12}$$

5.2.1.3　有效值快速计算方法的在FPGA硬件上的实现

在FPGA器件上实现的计算过程需要归结为整数的运算，所以公式(5-12)中的系数需要根据实际情况转换为分数形式表示的运算，并且将乘法运算按照FPGA的语法规范设计成移位和加法。

以某型号电力智能控制装置为例，系统采样频率为20KHz，采样周期是50us。当设定低通滤波截止频率为0.5Hz的时候，公式(5-10)中计算得到的α应该为：

$$\alpha = 2\pi \cdot 0.5 \cdot 0.00005 = 0.00015707963 \tag{5-13}$$

而公式(5-14)中K_1和K_2的数值应该为：

$$\begin{aligned} K_1 &= 1 - \alpha = 0.999842 \\ K_2 &= \frac{\sqrt{2}}{2} \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \alpha = 0.000174472 \end{aligned} \tag{5-14}$$

寻找适合于硬件计算的分数形式表示的近似值可以得到：

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{8191}{8192} \\ K_2 &= \frac{3}{16384} \end{aligned} \tag{5-15}$$

那么FPGA上就可以采用移位相加的方法完成迭代计算。VHDL（Very-High-Speed Integrated Circuit Hardware Description Language）语言形式表示的计算模块设计将如下算法表示：

```
1 effectReg <= effectReg  // 32 bits
2 -{{13{effectReg[31]}},effectReg[31:13]}
3 +{{13{absample[15]}},absample,3'b0}
4 +{{14{absample[15]}},absample,2'b0};
```

算法中，变量$effectReg$是32位带符号的整数寄存器，用于寄存定点小数形式存储的有效值历史值。在每一个采样时钟周期来临的时候，通过上述的算法生

成新的有效值计算结果并锁存至寄存器。算法中，*absample*是16位宽的信号采样绝对值，是有效值计算模块的整数型输入信号。

输出的时候，

```
1 assign effect = effectReg[31:16];
```

通过移位的方法获取32位的*effectReg*寄存器除以8192的结果，变量effect是FPGA模块的输出信号，其数据规范为16位整数。

5.2.2 实验结果和结果分析

为了验证基于FPGA实现电力信号有效值计算的可行性，在某型号电力控制器上组织了单纯软件实现与FPGA实现的运行效率比对，下面分别介绍实验环境、测量参数、测量结果以及对结果的分析。

5.2.2.1 实验环境和器材

验证试验的电力控制器周期，核心运算器件选用TI公司的TMS F28335，采样子系统选用了AD76068通道双极性输入数模转换器件，DSP与AD芯片之间的接口和前端运算FPGA选用了Altera公司的I代Cyclone芯片EP1C12Q240I7。

采样系统需要对24路工频信号同时进行采样监控和处理，DSP运行时主频为150MHz，FPGA运行主频60MHz，采样频率在软件方式处理时设定为5KHz，通过FPGA硬件辅助完成计算时采样频率可以提升为20KHz。

5.2.2.2 测量参数和测量手段

对比试验中，软件方法利用传统的求取平方和的平均值，然后开平方的办法完成24路电力信号有效值的计算。硬件方法中，将24路信号的有效值计算算法逻辑部署到FPGA芯片上，AD采样结果经过分析以后暂存在FPGA芯片上的寄存器里面。DSP只需要通过访问FPGA上结果寄存器组映射到的地址空间，即可得到目标信号的分析结果。

两种算法的起始和结束点都通过硬件逻辑在专门设置的芯片管脚上标志为电平的切换，然后就可以利用示波器精确测量两种算法所占用的时间。

5.2.2.3 测量结果

对比试验的测量结果如下表所示：

表 5.1　运行时间测量结果统计

次数	软件计算时间(ms)	FPGA计算时间(us)	加速比例(%)
1	2.0	10	200
1	2.0	10	200
1	2.0	10	200
1	2.0	10	200
1	2.0	10	200
Avr	2.0	10	200

5.2.2.4　实验结果的分析

有上述的测量结果可以看出，利用FPGA器件进行并行化处理以后，对电力信号的处理效率有着接近100倍的速度提升。这种速率的改进充分说明了本文中所提出的有效值计算方法的有效性。

5.3　基于FPGA计算的模拟采样直流偏置自适应校准

专利技术领域电力系统装置智能化控制专利申请人张华赢，姚森敬，曹军威，袁仲达，杨洁专利技术背景电力装置的智能控制系统，例如电能质量治理以及谐波治理的装置中需要配置采样设备，对需要控制的目标电能参数以及输出的电能参数进行采样，作为控制算法的基础和来源。电力参数的特点是电压等级高通常在几百伏特甚至到一万伏特，而控制器所能够直接处理的电压等级一般为5伏特到10伏特左右。所以，原始的电力参数信号需要通过PT/CT等电压转换装置，通过多次转换，将电压等级降低到低压采样能够处理的范围。电压等级转换完成以后，转换器的输出信号传递给ADC采样芯片，进行数字化处理获得数字式的参数表示方式，交由控制器上运行的智能控制软件进行数字化的分析计算。在电压等级转换的霍尔传感器处理环节，如果传感器的正负电压供给不平衡，就会在电力信号上叠加直流偏置；在ADC采样环节，ADC芯片的正负参考电压不平衡，也会给采样结果带来系统性的直流偏差。这种直流偏置叠加在电力系统的工频50Hz之上，会给后续的控制算法带来非常不利的影响，例如过零点检测的相位偏差、有效值计算的偏移以及谐波分量计算的频谱分布错误。为了弥补这一错误，目前常用的做法是利用标准信号源对采样系统进行校准：即使用信号源给采样系统输送一个标准的工频电压信号，然后统计分析采样系统最终得到的数字化信号，从中提取出直流分量以后，手动调校采样器件的供电电压平衡和ADC芯片的参考电压

平衡，或者在数字化以后的信号中，通过数字式的校正系数在原始的采样数值基础上减去校准计算得到的直流校正系数，获得没有直流偏置的采样结果。以往的做法中具有两个缺陷，一是需要过多的人工干预，参数的校准、核算和装订需要耗费大量的人力和时间；二是不具备通用性不利于批量生产，当供电系统、采样器件和ADC芯片切换的时候，就需要重复上述的校准、核算以及装订过程。针对上述的缺陷，本专利利用FPGA芯片的计算能力，完成电力参数采样的直流偏置自适应校准。

5.3.1　自适应校准问题

专利发明内容本专利技术利用了FPGA芯片的计算能力，通过专用硬件算法对ADC采样系统的输出进行前端预处理，能够自适应的对采样系统的直流偏置信号进行校准。

目标技术问题电力系统装置的智能控制环节中，采样系统的直流分量分析是一个非常必要的环节，目前的实现手段需要大量的人工干预，并且不具备扩展性。本专利采用FPGA硬件计算方法，自适应的对采样系统中的直流分量进行识别和校准，节省人工调节工作量的同时，提高采样系统硬件设备的通用性和可替换性。

5.3.2　控制器体系结构

总体技术方案电力系统装置的智能控制环节中，一般的硬件体系构架如下图1所示：

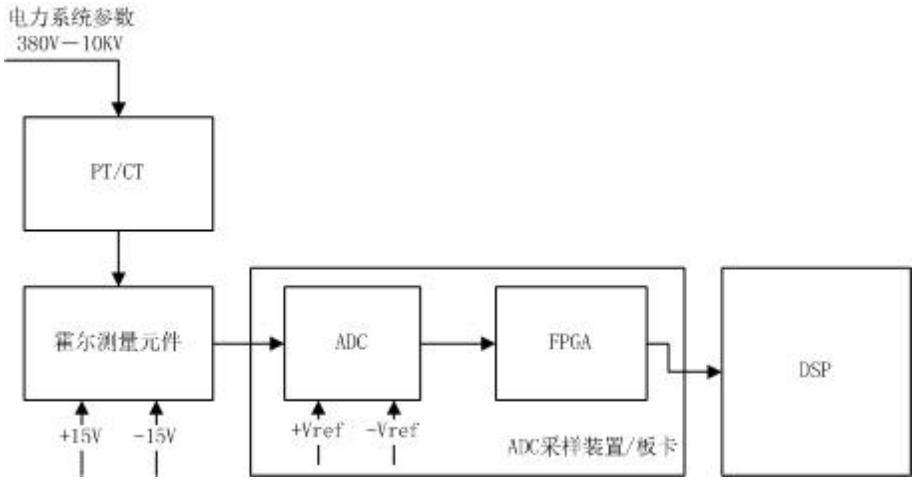

图 5.1　电力系统智能控制装置采样环节系统结构图

图 1 电力系统智能控制装置采样环节系统结构图

在图1中的体系结构中，电力系统高压信号经过一级或者多级PT/CT转换以后，利用霍尔测量元件转换成ADC采样装置或者板卡所能处理的电压水平。ADC芯片在板载的FPGA芯片控制下，完成采样过程形成数字化的数据，交由FPGA芯片，并通过FPGA芯片与控制器的核心处理器DSP进行进一步的计算。在这一转换和采样过程中，霍尔测量元件的供电电压如果出现了不对称，或者ADC采样器件的参考电压出现不对称的时候，数字化采样结果就会出现直流分量，进而对控制系统带来不利的影响。本专利的技术路线是利用FPGA芯片的硬件计算能力，在ADC采样结果传送到DSP之前，对其进行消除直流偏置的数字处理。有益效果利用FPGA的硬件计算能力对ADC采样的数字化结果进行自适应处理，可以有效的降低DSP运算的压力，提高电力系统控制系统中采样环节的运行效率和适应性。当发生电源系统供电偏差，或者采样器件进行更换的时候，避免对采样系统软件参数的重新校准装订。具体技术实施基于FPGA计算的模拟采样直流偏置自动校准的技术实施包含两个步骤：自适应的直流分量提取和自适应的直流偏置校准。自适应直流分量提取的原理是在FPGA上构造一个低通数字式滤波器，以0.1Hz左右的截止频率进行滤波，得到的滤波结果按照电力系统的设计经验可以认定为是直流分量，然后进行下一步的处理。低通滤波器的原理是在输入的数值序列x上，进行如下的迭代计算得到直流分量的序列y：

$$y_{(n)} = \alpha x_{(n)} + (1-\alpha) y_{(n-1)}$$

(1) 其中 α为滤波系数，与截止频率f_0 的关系为：

$$f_0 = \frac{\alpha}{2\pi t_s} = \frac{\alpha}{2\pi} f_s$$

(2) 上式中， t_s为ADC系统的采样周期， f_s为ADC系统的采样频率。直流分量y得到以后，做一次减法即可得到输入数值序列x中的交流分量z：

$$z_{(n)} = x_{(n)} - y_{(n)}$$

(3) 以采样频率$f_s = 20KHz$，采样周期$t_s = 0.5ms$的设计为例，截止频率$f_0 = 0.1Hz$那么对应的滤波系数：

$$\alpha = \frac{2\pi f_0}{f_s} = \frac{2\pi * 0.1}{20 * 1000} \approx 0.000031415926$$

(4) 滤波迭代计算公式

$$y = 0.000031415926x + 0.999968584074y$$

(5) 直流偏置自适应校准结果：

$$z = x - y$$

(6) 利用FPGA的计算能力进行直流偏置自适应校准的实现中，需要采用定点小数解决计算优化的问题。同样以采样频率$f_s = 20KHz$，采样周期$t_s = 0.5ms$的设计为例，截止频率$f_0 = 0.1Hz$对应的滤波系数。参数α需要首先近似转换成整数构成的分式表达式：

$$\alpha = 0.000031415926 \approx \frac{1}{32768}$$

(7) 采样系统的精度为16位的时候，直流分量提取的迭代计算公式变为：

$$y = \frac{1}{32768}x + \left(1 - \frac{1}{32768}\right)y$$

(8) 改写成FPGA硬件计算所能够表达的计算公式：

$$\begin{aligned} t &= (t - (t \gg 15)) + x \\ y &= t \gg 15 \end{aligned} \tag{5-16}$$

上式(9)中，算符‘+’表示无符号的加法，在硬件电路中可以用加法器ADDER实现；算符‘-’表示无符号的减法，在硬件电路中使用加法器ADDER实现；算符‘≫’表示二进制右移，在硬件电路中通过数据连线的偏移排列实现。在FPGA芯片内部中，加法器ADDER和寄存器组PRE是FPGA芯片中的编程资源。利用这些硬件电路资源，直流分量提取的硬件电路计算逻辑结构如下图所示：

图2 硬件电路计算直流分量的运算逻辑

上图2中，直流分量计算中间结果t由寄存器组$mean_reg$保存，加法器Add0完成公式(9)中的减号算符. 计算得到$t - (t \gg 15)$，并将计算结果送到加法器$Add1$作

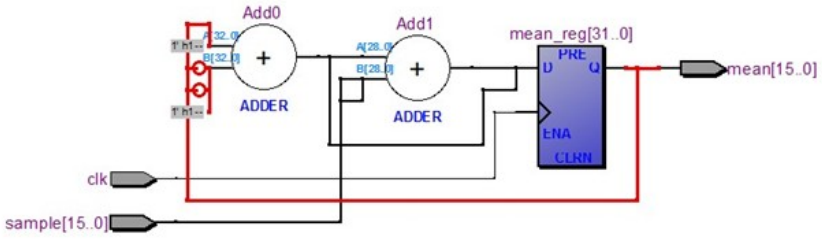

图 5.2　硬件电路计算直流分量的运算逻辑

为第一个输入。输入的数据x从sample端口进入运算电路，作为加法器*Add*1的一个输入。加法器*Add*1完成公式(9)中的加号算符，计算得到$(t-(t\gg 15))+x$，结果传送到寄存器组完成对中间结果t的更新。

最终的直流分量y从中间计算结果y中提取，通过数据连线的偏移和排序实现。直流分量y提取完成以后，校准以后的结果y_{opt}可以在直流分量的基础上再进行一次数学运算得到：

$$\begin{aligned} t &= (t-(t\gg 15))+x \\ y &= t\gg 15 \\ y_{opt} &= x-y \end{aligned} \tag{5-17}$$

作为运算公式5-17的完整实现，基于FPGA计算的模拟采样直流偏置自适应校准电路逻辑设计如下图3所示：

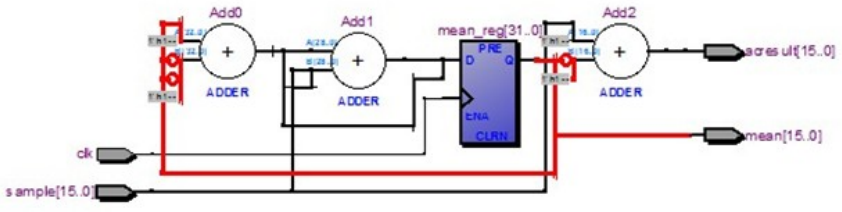

图 5.3　直流偏置自适应校准输出逻辑图

图3直流偏置自适应校准输出逻辑图上图3中可以看出，在图2所示的直流分量提取的基础上，增加了另一个加法器Add2用于完成公式(10)中的最后一行的减号算符。直流偏置自适应校准的最终结果通过端口acresult完成输出。

5.4　结论和展望

电力系统的智能控制中，需要对离散采集得到的电力信号做出数字分析才能够用于后续的智能控制策略。以有的系统中大多通过软件方法在控制器的计算核心完成数字分析，随着智能控制的信号来源数量增加，计算量的压力会随之增加，对控制装置的器件选型系统设计和成本控制带来巨大的压力。

本文以有效值计算为例，将电力信号的分析算法进行改进，采用等效的方法消除计算量，并且转移到FPGA器件上通过硬件完成计算。仿真和实验结果表明，由于利用了FPGA器件的计算能力完成大规模并行处理，信号处理的效率得以明显提升，对应的控制核心的性能需求明显降低。

本文中的算法改进和移植的思维，也可以用于其他类型的信号分析算法。下一阶段的研究中，将考察其他更加复杂的算法，通过FPGA计算获得性能和效率上改善。

第6章　能源互联网中远程控制远程调试技术

随着科学技术的不断进步，网络通信技术和ＤＳＰ技术飞速发展，许多智能仪器仪表、工业远程控制设备等能够接入到互联网，实现网络化、智能化的管理和控制。

网络通信能力的配备为智能化的控制装置的设计和研究开辟了新的空间。特别的，网络通讯技术和网络通讯能力能够为控制装置的设计、调试、测试乃至于部署以后的维护提供新的手段。

本章将介绍网络技术在智能化控制装置的远程调试和软件系统远程升级的技术，并以实际的工程为例说明基于以太网络的远程调试技术与远程软件升级技术的可行性。

6.1　前言

目前，DSP 已广泛应用于通信与信息、信号与信息处理、自动控制、雷达、军事、航空航天、医疗等系统。这些系统均要求其使用功能不断地完善、丰富和升级，或者按照用户的需求作出更新，对这类终端设备的程序维护大多采用开发人员携带编程工具到现场进行操作的方式，不仅工作量极大，费时费力，同时也不利于对整个系统的统一管理和维护都存在一定的问题。

随着科学技术的不断进步，网络通信技术和ＤＳＰ技术飞速发展，许多智能仪器仪表、工业远程控制设备等能够接入到互联网，实现网络化、智能化的管理和控制。在这些设备中，有很多是以ＤＳＰ为核心的设备，这些设备的程序代码的引导启动是一个很重要的问题。传统的ＤＳＰ设备的程序加载方法是通过硬件仿真器来完成的，但在实际工业应用中，这种方法存在仿真器携带不便携和设备软件维护更新不方便等缺点。因此基于网络的ＤＳＰ软件更新就是一种很好的解决方案。

由于数字技术、电子技术的不断发展，嵌入式设备被广泛应用于许多领域，而新技术的不断涌现和对系统功能、性能以及规模要求的不断提高的客观现实，对系统的可维护性，可更新性提出了新的要求。传统的升级方式是派技术人员到现场，用代码烧写工具在设备使用现场完成代码的升级工作，这样做的缺点是成本高昂，效率低下，给软件的更新和维护带来了难度。能进行远程升级和维护对未来嵌入式遥测遥控系统显得越来越重要。与上位机传统的通信媒介是 RS232，RS485，USB，CAN 总线，因为它们传输距离和成本的限制，使得这些方式在

实际应用中略显不足；虽然网络技术为嵌入式设备的更新提供了长距离的传输能力，但是在网络无法到达的复杂环境应用时又暴露了它的局限性。通用无线分组业务(general packet radio server，GPRS)的方便廉价使其成为首选通信方案。

6.2　采用以太网络传输的嵌入式系统远程调试技术

电力系统装置中的可编程智能控制器，一般由单片机作为控制核心，通过在其上运行的控制软件和控制算法对装置系统中的电能设备进行智能化控制。在实际调试和运营过程中，都存在软件系统和控制算法在线调试的需要。

6.2.1　远程控制远程调试问题

电力系统装置中的可编程智能控制器，一般由单片机作为控制核心，通过在其上运行的控制软件和控制算法对装置系统中的电能设备进行智能化控制。在实际调试和运营过程中，都存在软件系统和控制算法在线调试的需要。以往的单片机软件调试过程，都需要专用的硬件接口（JTAG）和硬件连线，对单片机芯片的运行过程进行调试操作。这种传统的做法中，虽然能够利用单片机的集成开发环境等成熟的技术，但是他要求调试用的终端设备与目标装置之间建立直接的电气连接，这对于野外或者高电压装置的调试过程来说会带来不便，甚至人身伤害的危险。

本章将介绍利用网络传输，与植入到软件中的调试模块建立数据通信，完成交互式的在线调试技术。

在具备网络通信能力的电力系统控制装置软件中，植入一个调试监控模块。上位机调试终端通过网络与调试模块建立通信链路，完成对DSP上的软件系统的交互式远程调试操作。植入的调试功能模块配合上位机调试工具可以完成：DSP程序运行中的断点设置，运行控制（运行、中断、继续、复位），变量内容查询解析以及强制设置，IO端口的读取和写入，以及堆栈空间解析（函数调用层级关系解析）等程序调试功能。

电力系统装置中的可编程智能控制器在实际调试和运营过程中，都存在软件系统和控制算法在线调试的需要。本专利技术利用网络传输，与植入到软件中的调试模块建立数据通信，完成交互式的在线调试操作。

植入的调试监控模块需要通信能力与上位机的调试终端建立网络连接。调试功能模块需要在DSP系统的后台运行，能够响应与上位机的网络通信协议完成数据的交互。并且，控制DSP前台目标程序，即待调试程序的运行和中断，读取和设置指定内存空间的数据内容，IO端口的读取写入，程序运行过程中堆栈空间的

解析已完成函数调用层级关系的解析和可读性显示。

上位机调试工具需要完成网络通信协议的解析，需要完成目标程序的调试信息提取，变量和运行地址的映射关系管理，以及堆栈空间内容的解析和文本显示。

电力系统控制装置典型的系统构架如图6.1所示：

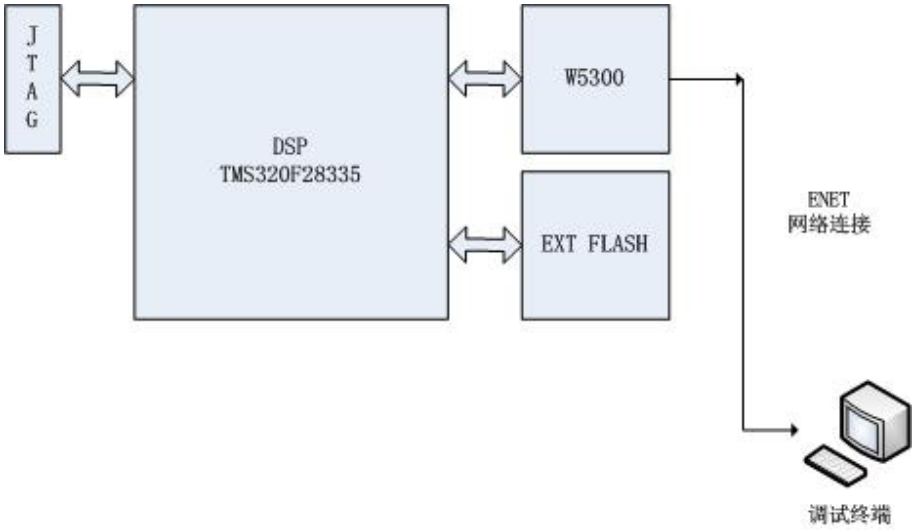

图 6.1　电力系统控制装置系统构架

在图6.1所示的典型硬件系统中，智能控制装置的计算核心DSP芯片TMS320F28335配备了网络通信器件W5300，通过它与上位机调试终端建立网络连接。DSP程序中植入的调试功能模块，通过网络与调试终端建立通信链接，响应调试终端的调试指令，完成DSP程序的运行控制和数据的查询设置。上位机调试终端的调试程序中接收用户的命令输入，形成网络通信包发送到DSP。等待接收到调试功能模块的反馈以后，将数据解析成可读的文本信息显示，或者形成数据文件进行保存以供后续的分析处理。

6.2.2　基于以太网络传输的嵌入式系统远程调试

远程更新功能的实现主要由以下几个步骤实现：

- （1）生成可执行文件。当DSP系统有参数需要进行重新设置或者有新的程序版本时，新的参数或新的程序在CCS编译环境中进行调试，生成.OUT文件；
- （2）生成引导表。通过TI公司提供的hex55转换工具将COFF目标文件转换为标准的十六进制格式（即HEX格式）。
- （3）将HEX文件转换为可写入FLASH的文件。由于hex格式文件还是不能直

接写入Flash，在本设计中将.hex文件再一次进行转换。用TI公司提供的应用程序$HEX_DAT.EXE$将$dsp.hex$ 文件转化为$dsp.h$文件，然后把它们存成一个数组$dspcode$[]。

- （4）编写PC程序，将数组$dspcode$[]作为用户数据嵌入到TCP协议中，并传输到远端DSP。
- （5）编写DSP更新程序，其中包括网络通信程序、擦除和写FLASH以及自加载功能模块。
- （6）写FLASH，加载新代码。DSP收到远端PC机的数据后，根据用户制定的协议进行解析，若是有数据要更新，则擦除FLASH，调用写FLASH模块，写入完毕，调用自加载功能模块，完成新程序代码或新参数的更新。

6.2.3　基于以太网络传输的远程调试系统实现方法

基于网络传输的控制器软件远程调试技术由植入的软件调试模块和上位机的调试终端软件协同完成。两部分的软件结构分别由下图6.2和图6.3所示。

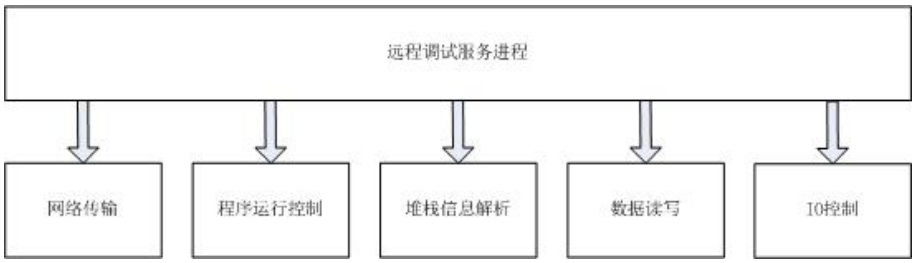

图 6.2　调试模块的软件结构

上图6.3中，调试模块的软件由六个部分构成。基础层面上的网络传输模块完成网络通信相关的功能；程序运行控制模块完成目标软件的断点设置和运行控制；堆栈信息解析负责完成目标软件断点出的运行场景也就是堆栈信息的解析，用于分析中断处的函数调用关系，参数和临时变量的查找；数据读写模块完成通用意义上数据的读写缓存；外部IO的在调试过程中的操作由IO处理模块负责。最后，最上层的远程调试服务进程负责整体的调度，和调试指令的接收解析和执行，以及执行结果的反馈。

上图6.3中，调试终端的软件有七个模块构成。上位机的网络传输模块负责与控制器的网络通信。用户输入的解析模块负责将用户的文本输入翻译成调试通信协议中的数据格式。调试结果解析模块负责将反馈回来的数据进行解释，形成文本格式的显示信息和用于调试过程记录的数据。数据存储模块专门用于反馈数据中额外数据的缓存和缓冲区管理。日志记录和数据记录模块用于管理记录用的文

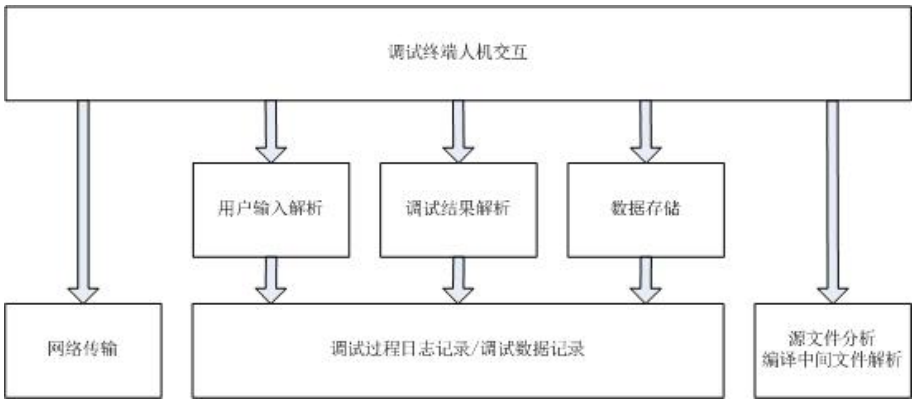

图 6.3　调试终端软件结构

件系统操作。源文件分析和编译过程中间文件解析模块用于分析C/C++，MAP，LST等文件，解析得到函数变量等的运行时地址映射表，提供给用户更加友好的程序运行状态信息的查询实现。最后最上层的调试终端交互界面，整个其他功能模块的功能，完成与用户的交互。

软件调试模块和上位机的调试终端软件两部分的控制流程分别由图6.4和图6.5所示。

植入的远程调试模块以最高的优先级在智能控制器的后台运行，初始化完成以后处于等待状态，不占用DSP芯片的运行资源。当通过网络通信模块接收到调试指令以后，启动调试功能。当调试指令到达并且校验通过以后，进行三个步骤的操作：将“接收确认”回复上位机，解析并执行调试指令，最后发送执行结果以及额外的调试数据。

上位机上运行的调试终端启动，初始化并且成功建立网络连接以后进入用户交互模式。使用者输入调试指令以后，需要进行合法性检测，以及变量或者符号的地址映射以完成网络传输数据包的构建。由于网络通信环境存在失效或者异常的可能性，调试终端在通信过程中，具备等待超时的判断逻辑，防止通信故障发生的时候程序陷入死锁状态。

6.2.4　技术应用和结果分析

基于网络传输的控制器软件远程调试技术可以脱离仿真器独立运行，更适合应用现场的软件调试和故障排除。网络通信过程完成控制台与控制器的电气隔离，为使用者提供了更加安全和稳妥的调试方案。

在深圳电网电能质量综合治理研究与工程示范项目中，文中的远程调试可以通过专用的调试控制台对配备了以太网络连接功能的控制器进行远程调试操作。允许的调试操作涵盖了基础的端口内存读写操作，查询和设定工作模式，以及高

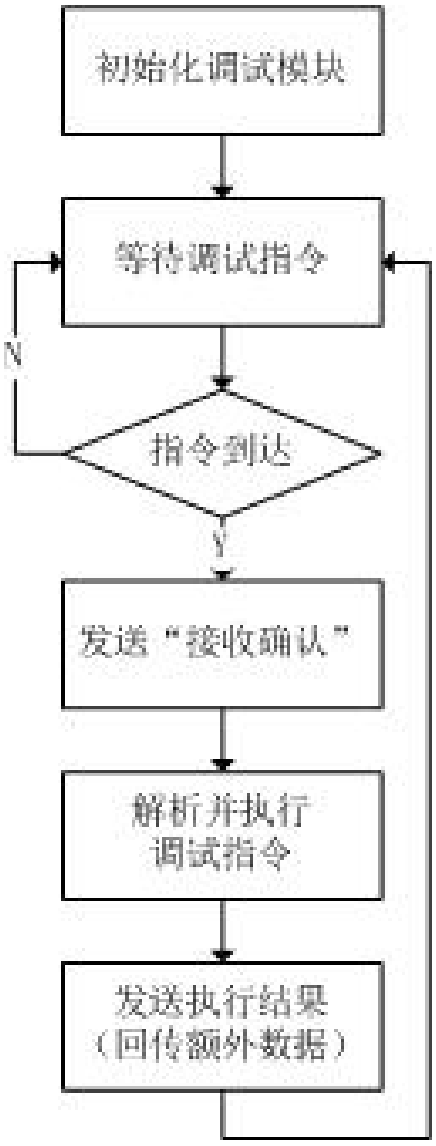

图 6.4　植入到DSP的远程调试模块的控制流程

级语法所支持的功能动作，以及控制器各项运行参数的实时查询和设定。

远程调试的功能减轻了装置在开发和调试测试过程中对JTAG现场连接的依赖性，为设备的调试提供了极大的便利。

6.3　基于网络传输和反向部署的DSP控制系统软件升级方法

电力系统装置中的可编程智能控制器，一般由单片机作为控制核心，通过在其上运行的控制软件对装置系统中的电能设备进行智能化控制。在实际调试和运营过程中，都存在软件系统升级的需要。

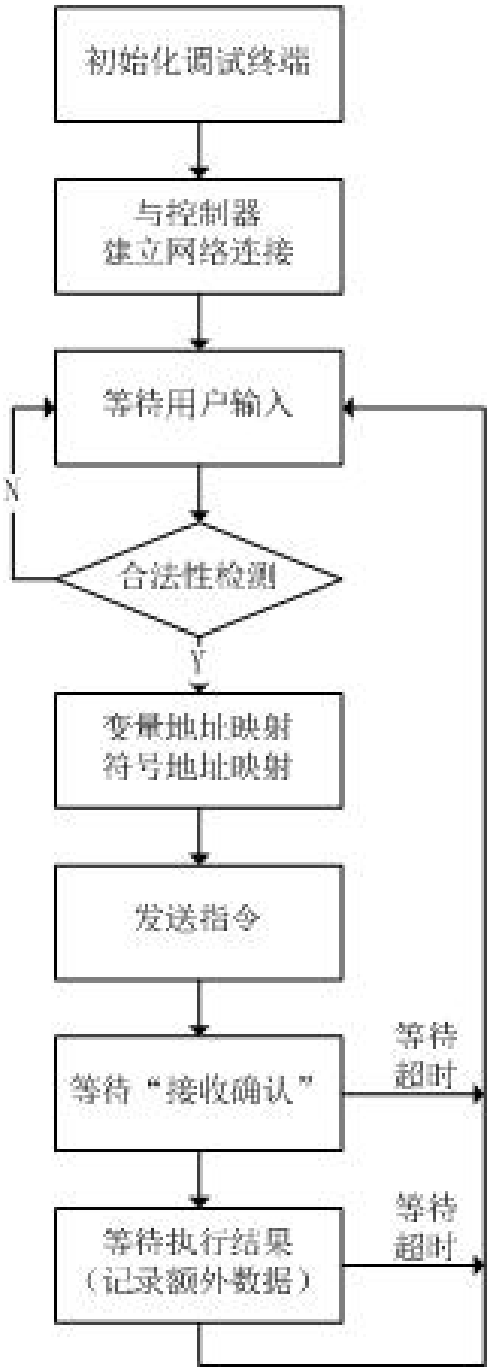

图 6.5　上位机调试终端的控制流程

6.3.1　远程控制软件升级问题背景

以往的单片机软件升级过程，都需要专用的硬件接口（JTAG）和硬件连线，对单片机芯片进行烧录操作。这种做法需要目标控制器在完成成品投入运营以后，预留一个硬件JTAG接口到机箱外部，这种做法会带来安全性和稳定性隐患。一些插卡式的控制器设计虽然允许板卡进行快速拆装，但是在板卡的拆装必然要求整体装置的断电，而且拆卸下来的板卡的软件升级过程中还需要特殊的供电和控制

平台，这些都是智能控制器软件的升级过程遇到的困难和不便。

已经存在的类似解决方案中，通过网络传输或者其他通信手段完成新版本软件的部署内容的传输，然后利用DSP的在线修改内（外）部FLASH内容的能力完成软件系统的更新。以往这些操作需要DSP使用一个庞大的内存区域作为缓冲区来暂存新的版本，这往往会带来系统的运行中断，因为内存资源对于DSP系统来说非常宝贵，通常情况下不会在运行过程中留有太多的空闲内存。此外，不稳定的网络传输过程，也会带来系统崩溃的风险，因为网络传输一旦发生故障或者中断，不完整的更新数据将使得系统无法正常启动，然后依然需要回退到JTAG模式进行初始程序的烧录。

为了解决上述问题，本专利改进了利用网络通信技术对智能控制器进行软件升级的方法中的缓存和烧录过程，能够在电能控制装置不拆卸不断电，甚至不中断运行的情况下，进行软件系统的更新升级。新的方法可以减少内存缓冲区的设定，同时能够抵御网络传输链路的不稳定性带来的升级风险。

电力系统装置的可编程控制器件通常会配备网络传输接口，以完成和更高层主控装置的高速通信和高语义级别的控制。典型的组合方式由TI公司的TMS320F28335和WIZnet公司的W5300以太网通信芯片构成。

在这种系统构架之下，本专利的创新点是通过网络通信能力将控制软件的二进制编译结果传送到控制器的单片机的网络传输缓冲区。经过校验以后，单片机上的伺服程序以调试中断的方式将对应的二进制代码完成运行代码的运行时更新。传输过程以代码的片段为单位，每次更新过程的数据量控制在1KB以内，增量式的对所有代码完成更新以后，启动运行镜像到FLASH内容的转换过程，并将转换以后的内容存储（烧写）到片上或者片外的Flash中完成固化代码的更新。烧写过程以后台方式运行不影响DSP上程序的持续运行，烧写结束以后也不需要DSP进行重启。当控制器进行检修或者更大规模维护的时候，重新启动过程将使用新版本的控制程序引导启用，进而完成软件系统的全面升级。

电力系统控制装置的软件升级操作中，以往的实现过程需要JTAG方式对DSP芯片进行硬件连接，会给控制器软件系统的升级带来诸多不便。本专利提出的方法采用网络传输的方式将控制软件的二进制编译结果分片进行更新到DSP的运行内存空间，并在后台时间转换并下载到FLASH存储空间。本专利的方法避免了在线升级时对专用烧录器和烧录接口的依赖，减少了对网络缓冲区的需求压力，并且能够以不中断DSP运行的方式完成软件修改和升级。控制软件升级方式的改变，使得软件设计和调试更加便捷。

6.3.2　远程控制软件升级原理

电力系统控制装置一般的系统构架如图6.6所示：

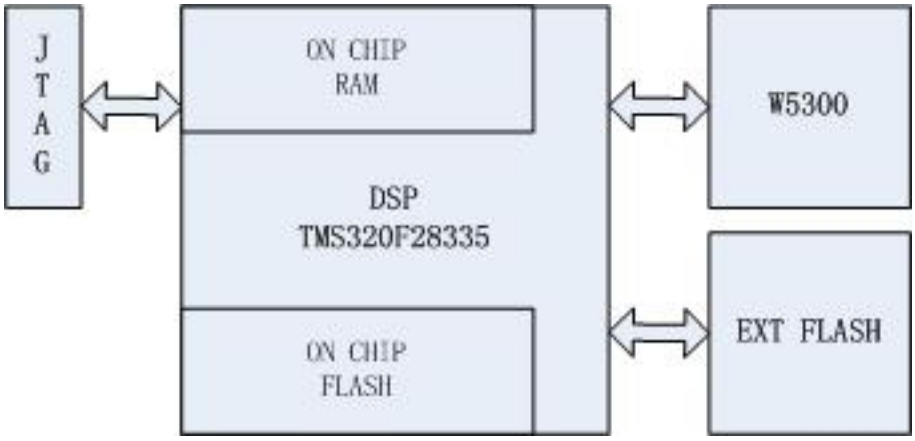

图 6.6　电力系统控制装置系统构架

DSP的软件更新以往的方法都是使用专用的烧录器，以JTAG的方式与芯片建立硬件连接，芯片对应的专用开发环境完成软件编写以后，使用专用的烧录软件将编译结果下载到片上的RAM进行在线运行或者片上的FLASH进行离线运行。

本将介绍的技术方案是将软件编译的结果，通过网络接口芯片W5300传输到DSP芯片，然后通过其FLASH API将对应的编译结果写入片上FLASH，进而完成不需要JTAG接口的软件升级。

6.3.3　远程控制软件升级技术实现

网络推送式控制系统软件升级技术由软硬件技术协同完成。

硬件设计需要采取如图6.6的构架，DSP芯片能够与外部通过W5300等网络接口芯片进行通信。软件开发工作站需要配置基础的软件开发环境，配备网络传输设备，并与DSP芯片建立以太网络通信。

6.3.3.1　远程控制软件升级基于以太网的数据传输和存储

软件部分由两大部分构成，上位机转换部署软件和DSP上的通信伺服模块。上位机的转换部署软件首先完成二进制编译结果，一般为OUT格式。编译完成以后，根据编译结果中符号表的信息，将OUT格式的文件按照函数或者功能模块拆分成若干片段，交给网络传输模块发送到DSP端。DSP端的网络伺服模块接收到更新数据并完成校验以后，在控制任务空闲的时间片里，完成代码的实时替换。

当所有需要更新的代码片段完成传输和替换以后，软件动态升级部分的工作完成。

6.3.3.2　远程控制软件升级的逆向部署技术

软件动态升级部分的工作只能够升级正在运行的程序映像，系统断电重启或者软件复位的时候，这些修改会丢失，所以需要将正在运行的软件固化到FLASH存储空间。程序运行时的内存影像并不是直接的目标FLASH映像，要进行一次格式转换才可以变成烧录的FLASH存储内容映像。最后通过预先设定的FLASH烧录模块以完成FLASH内容的更新。软件在线更新完成以后，DSP不需要重新启动就可以引导新版本的控制软件运行。

软件更新的工作流程如下图6.7所示。

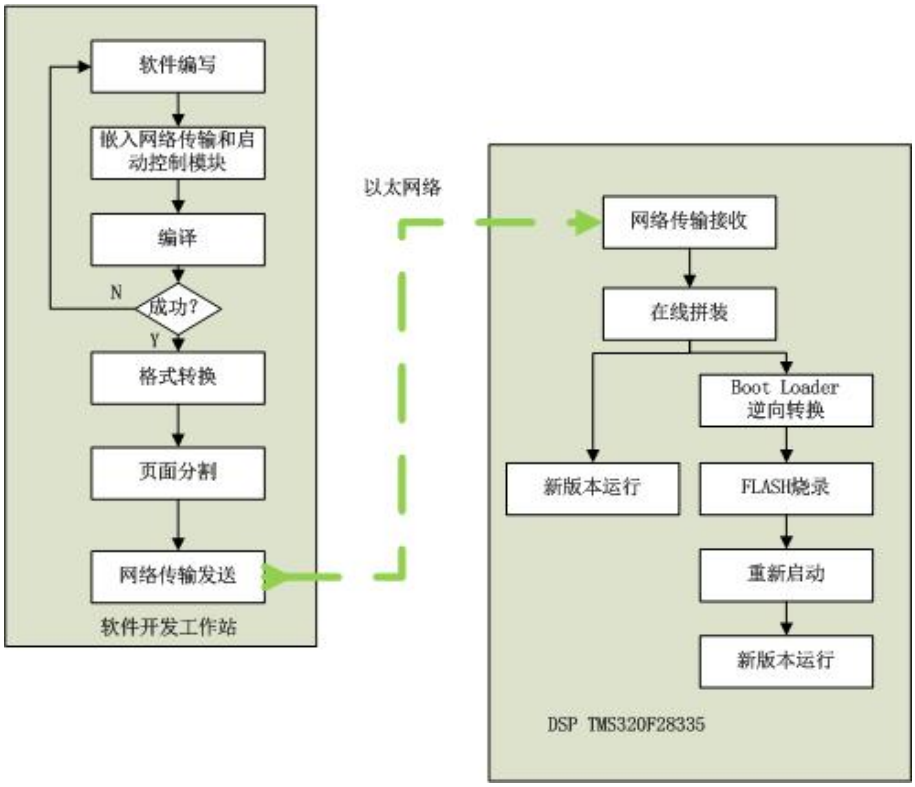

图 6.7　网络推送式嵌入式软件发布流程

在软件编写环节，按照以往的设计流程对业务软件进行设计和编辑。启动编译之前，DSP开发的IDE环境需要自动嵌入网络传输和自启动控制相关的软件模块，然后将整合以后的软件进行整体编译。编译过程如果出现错误，则需要回退到设计和编辑阶段，对代码做相应的调整。

编译成功以后的二进制输出文件需要进行格式转换和页面分割，将DSP开发

环境生成的OUT格式的文件转换成推送升级所需要的片段式的二进制流。转换成功以后，软件开发工作站中的网络传输模块启动，将二进制流按照页面为单位传送到目标DSP的缓冲存储空间。

DSP当前运行的软件中，网络传输模块接收到升级数据以后，启动在线拼装过程。拼装过程中，伺服模块挪用控制周期中的空闲时间，将对应的二进制代码完成运行代码的运行时更新。运行时的更新过程不需要中断控制程序的运行。运行代码的在线拼装过程完成同时意味着软件升级动态部分的完成。

软件动态升级部分的工作只能够升级正在运行的程序映像，系统断电重启或者软件复位的时候，这些修改会丢失，所以需要将正在运行的软件固化到FLASH存储空间。程序运行时的内存影像并不是直接的目标FLASH映像，要进行一次格式转换才可以变成烧录的FLASH存储内容映像。最后通过预先设定的FLASH烧录模块以完成FLASH内容的更新，完成完整的软件在线更新。以后DSP重新启动的时候，就可以引导新版本的控制软件运行。

6.3.4　技术应用以及结果分析

通过网络下载程序完成对应控制软件升级的技术能够摒弃对DSP芯片专用烧录接口和专用烧录设备的依赖，简化控制器硬件的设计。减少器件设备的外部接口，有助于提高系统的运行稳定性和抗干扰能力。

在深圳电网电能质量综合治理研究与工程示范项目中，文中的远程升级操作可以通过专用的远程升级控制台对配备了以太网络连接功能的控制器进行软件重新部署或者执行代码的升级。结果表明，文中提出的方法能够完成代码的自动化转换，网络传输的缓存，以及程序代码的在线固化。

6.4　总结和展望

网络通讯能力逐渐成为智能控制装置的必要配置，高带宽的通讯和传输需求也越来越好打额支撑着智能控制装置的更新和换代。

本章从远程调试和远程程更新两个角度研究了网络传输功能在程序设计和软件维护过程中的应用，并取得了肯定性的效果。在不就得将来，互联网技术与电力电子技术的充分融合，将推动智能电网向着能源互联网的方向推进，届时网络通信将成为能源互联网节点之间信息互通的有力支柱。作为能源互联网基础研究工作之一的智能化控制器中网络通信技术和网络通信应用的研究，可以预见的必然成为研究的热点。

第7章　能源互联网中整体测试装置

能源互联网是智能电力技术的升级结果，其核心装置依然保持着电力控制装置的一些外在参数和特性，因此原有的部分电力控制技术相关的测试与验证技术，依然是能源互联网领域的研究对象。

本章节将集中介绍用于控制器整体测量的装置设计与测量信号的模拟生成技术。

7.1　前言

电能质量的模拟测试，需要测量装置模拟电网中的电压波动，也就是生成电压跌落的信号。对于大功率的电力电子设备测试来说，电压跌落的信号由于电压等级高，电流强度大等困难因素，一直是一个难以解决的问题。

已有的电压跌落发生装置主要有三种：阻抗形式、变压器形式和电力电子变换形式。阻抗形式的电压跌落发生装置造成的能量损耗较大,电力电子变换形式的电压跌落发生装置成本高，控制复杂，可靠性不够。传统变压器形式的电压跌落发生装置比阻抗形式能量损耗要小，结构简单，容易实现，但普通变压器变比不可调，所获得的电压跌落深度是固定不便的，若采用带中心抽头的变压器，设计和工艺复杂，造价高昂并且不适合于高电压等级的应用。而且，所得到的跌落深度类型与抽头数量相关。另外，变压器形式的电压跌落发生装置不能实现对电压跌落相位的控制。

已有的电压跌落装置，多数采用传统耗能式阻抗负载，并且均未考虑跌落装置能量回收利用的问题，造成了能源的白白浪费。传统负载的通风、散热都需要进行相应的设计，为降低因耗能负载带来的温升则需要风机等来降低温度，带来能源的二次浪费。同时，由于自身功率大，带来的安全系数低等风险因素。同时，对依托电网的影响大等不利等实验条件苛刻，为大功率的电力设备测试和功能验证带来一定的困难。

针对上述问题，本章将介绍一种带能量回馈的电压跌落发生装置，采用电子方式对测试对象的模拟负载中原本会耗散的能量加以回收，已完成测试环境依赖程度的降低。

7.2　电能回馈型电压跌落发生

能量回馈的电压跌落发生装置由以下五个功能模块构成：电网电源接入、电压跌落调节、电力电子负载、隔离变压器和核心控制器。

装置运行过程中，可以模拟电网电压的各种故障，如电压跌落、闪变、过电压、欠电压、三相不对称故障、相位移动等，针对电网电压跌落，可以方便地连续控制电压跌落深度、持续时间、相位变化大小和跌落的类型。同时可将能量回馈电网，灵活控制电能质量，避免了能量流失，避免了传统负载对人力、物力及空间的浪费。同时由于实际耗散功率的缩减，安全性上有明显提升，对依托的电网产生的扰动明显改善。

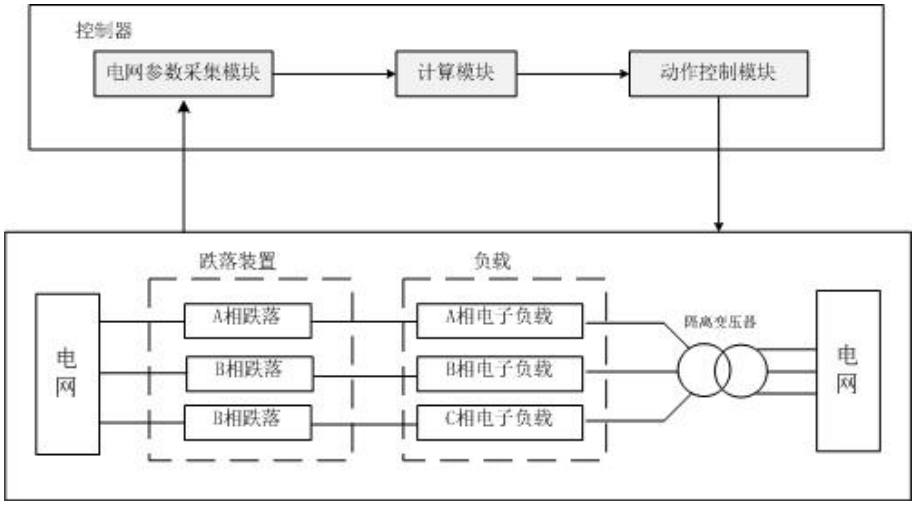

图 7.1　电压跌落装置系统图

测量装置的特点如下：

- 1.相对于阻抗形式电压跌落装置，本实用新型电压跌落发生装置能量损耗很少，结构简单，容易实现。
- 2.相对于电力电子形式的电压跌落装置，本实用新型价格低廉、可靠性高。
- 3.本实用新型采用电动调压器，可实现跌落深度的连续调整。
- 4.采用三台单相调压器，可实现三相不平衡跌落，灵活控制跌落形式。
- 5.采用三台单相调压器与电抗器相结合，可实现电压跌落与相位变化的灵活控制。
- 6.采用电力电子负载，与传统电阻、电感、电容等构成的负载相比，能够节约能源，避免能源二次浪费，节约人力物力成本。
- 7.采用三相独立电力电子负载，灵活度高，可根据需求模拟不同的负载大小。可以根据实际需要对电流幅值、功率因数、波峰因数等参数进行灵活设

定，同时将电能高效馈回电网，既方便又节能。

7.3　电能回馈型电压跌落模拟原理

图7.2为装置原理图，包括：电网电源、电压跌落装置、电力电子负载、隔离变压器和控制器。其中：电网电源为交流变频电源，为将电网中存在的波动的电压转化得到的特定频率的稳定电压。

电压跌落装置包括三台单相电动调压器、三台单相可调电抗器、六个真空继电器KM1-KM6。三台单相电动调压器，均为大容量变压器，且可通过调整，实现升压与降压。三台单相电动调压器，采用Y-△接法，原边输入为电网电压，副边输出电压可调，即为跌落电压。若三个单相调压器副边输出电压相等，则产生三相电压对称跌落故障；若三个单相调压器副边输出电压不相等，则产生三相电压不对称跌落故障。

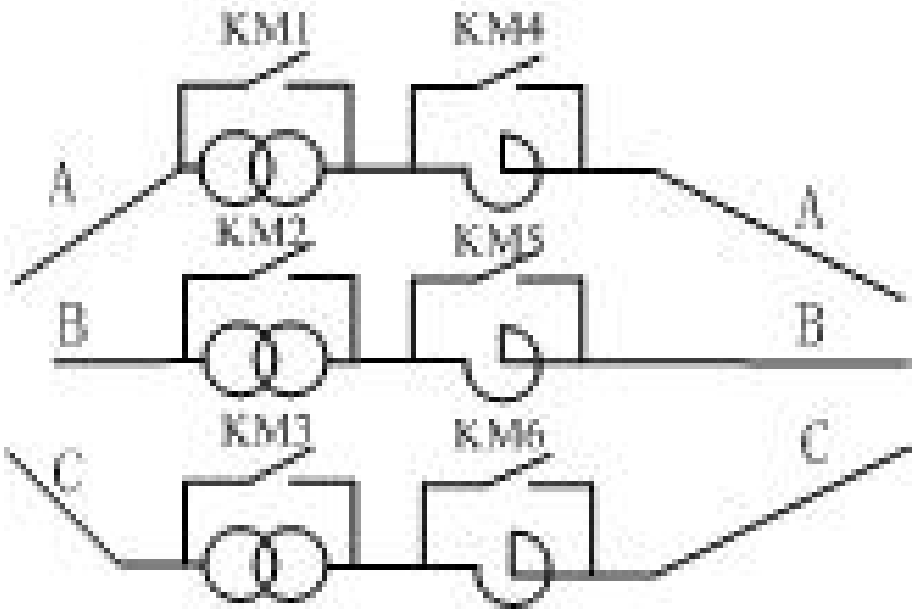

图 7.2　跌落部分原理图

三台可调电抗器，用于产生相位变化，可根据所需要产生的相位角及负载大小，调整电抗器大小，并计算随之带来的压降，如不需要压降，则将电动调压器调整为升压变压器，以弥补压降。

电力电子负载由采用PWM控制的电压源型整流器作为基本结构的输入负载模拟变换器与输出并网变换器构成，两变换器由直流支撑电容相连，形成背靠背的整体结构，其主电路图如图7.3所示。

采用S1-S4作为并网变换器的主开关器件， L1作为输入电感，R1是输入变换

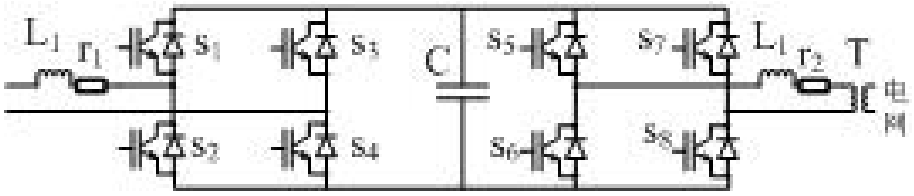

图 7.3　单相电力子负载

器的寄生电阻，它是考虑导线本身和连接接头、开关导通耗损和死区作用等引起的阻尼作用的等效电阻，采用S5-S8作为并网变换器的主开关器件，L2作为并网变换器输出电感，R2是并网变换器的寄生电阻。并网变换器需要准确跟踪电网的相位与频率，将电能以高功率因数馈回电网，C为直流母线支撑电容，在电力电子负载工作时，母线电压恒定，输入、输出功率在此进行交换并达到平衡。

输入模拟负载变换器该装置由模拟负载变换器和并网变换器组成,其中模拟负载变换器的主要功能是灵活、准确的模拟各种实际负载特性，如阻感性负载、阻容性负载、非线性负载、动态负载等。

输出并网变换器的作用为：确保系统能量平衡，将输入变换器能量馈回电网，达到节能、环保的测试目的；通过适当的控制方式确保馈网电能质量，即馈网电流功率因数高，同时要求馈网电流谐波含量少；保证直流母线电容电压为恒定值，从而保证输入、输出PWM变换器稳定工作。

采用单相全桥结构作为电力电子负载电路拓扑原因在于该变换器进行适当变换和联接同样适合于三相电路，且不受连线类型影响，三相相互独立，方便三相不平衡试验，具体连线如图7.4所示。

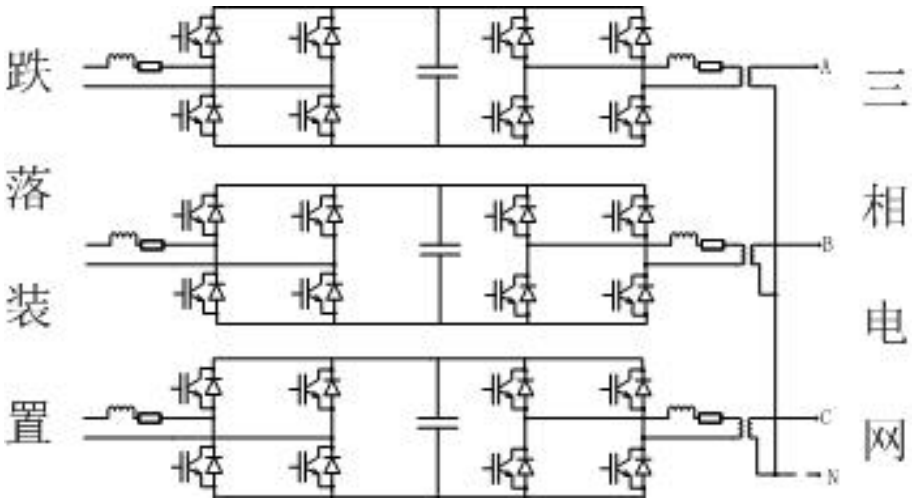

图 7.4　三相电力子负载连线图

隔离变压器T为并网连接变压器，它确保电力电子负载与电网电气隔离，避免因为被试电源为非隔离电源可能造成的电气短路状况发生，

控制器包括电网参数采集模块、计算模块和动作控制模块等，需完成参数设定、系统监测、设备保护、通讯、实时控制变换器开关器件等功能。

电网参数采集模块负责采集电网侧与负载侧电压电流，需要用到电压互感器与电流互感器。

计算模块负责根据所需要的跌落类型、跌落深度、相位变化要求以及负载大小，自动计算每相电路所需电抗值与变压器值。

控制模块负责电抗与变压器的调整，及继电器的开合控制。并产生输入变换器与输出变换器的控制信号。

7.4　实现方案

一.不同类型电压跌落

- 1.三相跌落无相位变化：断开KM1、KM2、KM3，闭合KM4、KM5、KM6，通过调整三台电动调压器，可得到三相电压平衡或不平衡跌落现象。
- 2.单相跌落无相位变化：断开KM1，闭合KM2、KM3，闭合KM4、KM5、KM6，即可造成A相电压单独跌落，并可通过调整A相中电动调压器来控制低落深度。同理，可发生B相或C相单独电压跌落。
- 3.两相跌落无相位变化：断开KM1、KM2、闭合KM3、KM4、KM5和KM6，即可造成A相与B相电压跌落，C相电压不跌落，并可通过调整A相与B相中电动调压器来控制跌落深度，同理，可发生任意两相电压跌落试验。
- 4.相位变化：通过控制接触器KM4、KM5、KM6的开合，可控制电路中电压是否发生相位变化，并可通过可调电抗器参数调整来调整相位变化大小。同时计算因相位变化造成的压降，如果电压跌落深度超出需要的深度，则可以调整相应相位的调压器为升压变压器，以获得合适的电压跌落值。如果此时电压跌落深度不够，则可以调整相应相位的调压器为降压变压器，以上均为计算模块的工作。
- 5.过电压：断开KM1、KM2、KM3，闭合KM4、KM5、KM6，通过调整三台单相电动调压器，可得到相同或不同的三相电压升高值。

二.电力电子负载模拟真实负载

这里令电力电子负载模拟稳态线性负载，采取恒流模式，保持指令电流幅值不变，控制器控制输出电流跟踪指令电流为恒定值，电压电流比为常数，即实现了模拟稳定电阻负载。电力电子负载模拟模块输出电压为直流电压，输送给后续的直流逆变模块完成能量回馈功能。

三.负载能量回馈电网

采用成熟的PWM调制技术对电力电子敷在模拟输出的直流电压进行逆变。逆变得到的工频交流电并入来源电网，完成能量的回馈。

7.5　实验结果以及分析

在深圳电网电能质量综合治理验证示范工程项目的支撑下，本文提出的模拟测量信号发生装置对UPQC设备的运行情况进行了实地测试检验。结果表明测试过程对实际电网产生的负载，与单纯的耗散性负载相对比，能够减轻90%的电能损耗。

7.6　总结和展望

电力装置的研发和测试过程中，对外在的测试设备和测试手段也提出了更高的要求。尤其是高电压等级，大功率超大功率电力设备的投运，更需要对应的测量设备和测试手段对目标设备的正确性和可靠性进行检验。

文中提出的能量回收型电压跌落信号发生装置就是一种新型的综合测量信号发生装置，以能量回馈的模式将原来设计方案中需要耗散的能量进行回收。能量回收的过程不仅有效的避免能源损耗的同时，提升了测试过程的安全系数，同时减轻了对测试环境的压力。并且，测试过程所需要的成本投入也可以得到削减。

第8章　总结和展望

在过去的几年里，锁着社会电能消耗的持续增长，电网在重载荷的情况下，面临可靠性下降和能量成本上升的压力。因此智能化的电力控制技术应运而生，并且逐步向着能源互联网的方向发展。最终目标下，能源互联网以互联网的概念下构建新型的信息与能源相互融合的广域网络，以开放对等的信息能源一体化构架真正实现能源的双向按需传输和动态平衡使用。通过最大限度的适应新能源绿色能源的接入，降低社会的发展和经济的运行对环境造成的压力。

8.1　总结

本文中，以清华大学承担的深圳电网电能质量综合治理研究与工程示范项目为依据和核心，开展了智能化的电能质量控制器相关的研究。研究工作中模块化电能质量控制器的硬件技术和嵌入式控制软件设计技术。针对电能质量控制这一个特殊的领域，硬件设计中研究了模块化的设备整体构架设计技术；嵌入式软件设计过程则采用了误操作系统的精简设计，最大限度的提升系统资源运用的效率。

在电力信号分析环节，研究并改进了电网信号的实时检测算法，提出了适用于FPGA计算的正常情况下的电力信号有效值快速计算算法并且完成到FPGA硬件逻辑的移植和运行测试。

FPGA计算能够带来的性能提升已经是计算机体系结构设计以及高性能计算领域研究人员的共识，本文中在使用FPGA进行模拟量的电网信号的处理同时，将FPGA计算的思路引入到电能质量控制器的硬件软件实现过程中，完成了基于FPGA逻辑的软件死锁保护、可动态编程的逻辑信号检测、模拟采样系统中系统误差的自适应校准等技术的研究，并申请相关的多项发明专利。

远程控制和远程调试对于电能质量控制装置来说，是一个关键的功能。本文针对此类终端设备的程序维护和测试过程中的现场操作困难，在总结已有研究的基础上提出了基于以太网络传输的嵌入式系统远程调试和远程软件升级方法，解决了在测试过程中遇到的效率低下的问题。

电能质量控制器相关的电能设备测试技术是产品和装置可靠性的最终保证之一，针对已有的测量技术能耗过高的缺点，研究了电力电子变换方式实现的具有能量回收功能的电力信号模拟和测量技术，可以明显节约测试过程需要产生的成本。

8.2　展望

能源是人类生存发展的重要物质基础，但从世界范围来看，能源可持续发展的问题始终没有得到根本解决。解决能源问题，已不是简单地增加能源供给、提高能源利用效率，而是需要全面的变革，这个变革把能量流和信息流耦合，建立一个全新的能源体系，形成能源应用的创新形式。基于现有的能源基础设施，可再生能源资源在传输和利用等方面仍存在瓶颈，基于现有的能源基础设施，运用先进的信息和互联网的理念、方法和技术，与可再生能源技术相结合，构建能源互联网，为实现能源可持续发展提出了一条可预见并且具有可行性的技术路线。

能源互联网就是在现有能源供给系统的基础上，通过新能源技术与互联网技术的深入融合，将大量分布式能量采集装置和分布式能量储存装置互联起来，通过智能化的管理，实现能量和信息双向流动的能源对等交换和共享网络。

电能质量控制相关的基础技术，作为能源互联网的前身和支撑，在能源互联网的发展过程中，必将得到更深入的研究和提升。能源互联网的核心装置能源路由器的研发过程中体现出来的小型化，模块化，智能化和网络化的需求，必将成为智能控制装置设计和制造技术实现的有效推动。

参考文献

[1] Brito N S D, Souza B, Pires F A C. Daubechies wavelets in quality of electrical power. International Conference on Harmonics and Quality of Power Proceedings, 1998. Proceedings, 1998. 511 – 515.

[2] 刘超, 邢曙光, 杨曦娥. 小波变换vc6.0程序实现. 电脑知识与技术, 2010, 6(1X):615–616.

[3] 刘桂英, 刘承员, 粟渊恺. 短时电压变动的小波变换模极大值奇异性检测方法. 长沙理工大学学报:自然科学版, 2009, 6(2):44–50.

[4] 赵红怡, 武梦龙, 曹淑琴. 小波分析在突变信号检测中的应用. 北方工业大学学报, 2004, 16(1):21–24.

[5] 霍乾涛. 电力系统中的电压瞬间跌落研究[D]. 中国浙江: 浙江大学, 2004.

[6] 郭晓丽, 刘建兰, 吴晓, et al. 电压波动信号检测方法的仿真研究. 电力系统及其自动化学报, 2006, 18(2):41–44.

[7] 曾黎玉, 王英健, 郑理科. 基于快速提升小波变换的电能畸变信号模极大值检测方法. 长沙理工大学学报:自然科学版, 2007, 4(4):56–59.

[8] 苏新, 李广凯. 一种电力系统交流信号测量的优化方法. 中国高等学校电力系统及其自动化专业第二十七届学术年会, 秦皇岛，中国, 2011. 1–6.

[9] 方路平, 张浩, 项新建, et al. 一种电网电压信号的快速测量方法. 工业控制计算机, 2015, 28(6):163–167.

[10] 徐垦. 交流信号真有效值数字测量方法. 华中科技大学学报（自然科学版）, 2006, 34(2):51–53.

[11] 宁建行, 迟长春, et al. 基于快速傅里叶变换的剩余电流真有效值算法研究冰. 电气与能效管理技术, 2015, 17(1):13–16.

[12] 庞吉耀. 一种获得交流信号真有效值方法. 现代电子技术, 2015, 38(13):53–55.

[13] 许国明, 曹达, 周乾, et al. 一款0～2000hz交直流通用的真有效值变送器设计. 技术与应用, 2015, 2(1):73–75.

[14] Tessier R, Burleson W. Reconfigurable computing for digital signal processing: A survey. Journal of VLSI signal processing, 2001, 28(1):1244–1245.

[15] 白炳良, 王灵芝. 基于pic及fpga的建议信号分析仪设计. 大学物理实验, 2015, 28(1):14–18.

[16] Song L G, Jiang Y X. Fast parallel fft on ctaiji: A coarse-grained reconfigurable computation platform. Parallel and Distributed Processing and Applications, Third International Symposium, ISPA 2005, Nanjing, China, November 2-5, 2005, Proceedings, 2005. 188–195.

[17] Park J H, DaiS H. Reconfigurable hardware solution to parallel prefix computation. Journal of Supercomputer, 2008, 43:43–58.

[18] Sangjin Hong S C. Domain specific reconfigurable processing core architecture for digital filtering applications. journal of VLSI signal processing, 2005, 40:239–259.

[19] Tseng P, Huang C, Chen L. Reconfigurable discrete wavelet transform processor for heterogeneous reconfigurable multimedia systems. Journal of VLSI signal processing, 2005, 41:35–47.

[20] Nagvajara P, Nwankpa C, Johnson J. Reconfigurable hardware accelerators for power transmission system computation. HPC in power and energy systems, 2013, 00:211–228.

[21] Krichen F, Hamid B, Zalila B, et al. Development of reconfigurable distributed embedded systems with a model-driven approach. Concurrency and computation: practice and experience, 2015, 27:1391–1411.

[22] Luppi P, Outbib R, Basualdo M. Nominal controller design based on decentralized integral controllability in the framework of reconfigurable fault tolerant structures. Industrial and Engineering Chemistry research, 2015, 54:1301–1312.

[23] Min J J, YunLung L, ChenYen L, et al. A novel reconfigurable computation unit for dsp applications. IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI: Emerging VLSI Technologies and Architectures, Porto Alegre, Brazil, 2007.

[24] Perera D, Fun L K. Similarity computation using reconfigurable embedded hardware. Proceedings of the 2009 international conference on dependable, autonomic and secure computing, Chengdu, China, 2009. 323–329.

[25] Diniz P C, Cardoso J M. Code transformations for embedded reconfigurable computing architectures. Lecture Notes in Computer Science, 2011, 6491:322–344.

致　谢

衷心感谢导师曹军威研究员和吉吟东研究员对本人的精心指导，他们的言传身教将使我终生受益。在完成清华大学以及张家港智能电力研究院进行的研究和执行项目期间，承蒙清华大学电机系刘文华老师，武汉大学的乐键，上海交通大学的姚刚等老师的热心指导与帮助，不胜感激。同时感谢与我一起努力在一线的同仁杨明博博士，杨洁博士，以及张少杰，胡俊峰等科研人员，与你们通力合作和诚恳交流，是一段十分美好的经历。感谢清华大学信息技术研究院的各位同事和老师，尤其是负责后勤行政的陈建会、张艳荣以及林季凤同事，为我们科研工作提供了有力的后勤和保障。在博士后研究和工作期间，项目以及课题承蒙国家自然科学基金和南方电网深圳供电局资助，特此致谢。

感谢 ThuThesis，它的存在减轻了本人论文写作压力。

个人简历、发表的学术论文与科研成果

个人简历

1976 年 04 月 13 日出生于河北省深州市。

1994.8-1998.7，在位于北京怀柔的总装备部指挥技术学院，就读于首届飞行器测试与发射工程专业，并获得学士学位。与此同时，攻读计算机应用专业，并获得计算机应用专业的第二学位。

1998.8-2003.6，在太原卫星发射中心，任职助理工程师，负责某无线电子系统测试工作。

2003.06 - 2006.07，在清华大学人智所，并获得硕士学位。期间研究和工作内容广泛涉及虚拟现实，神经网络以及数据挖掘等方向。期间独立或者主持完成过若干虚拟现实以及数据挖掘的工程项目。毕业论文题目是《利用可持续进化的神经网络进行数据挖掘》。

2006年9月开始，在清华大学软件所EDA实验室导师边计年教授指导下攻读博士学位，2014年7月毕业。博士期间研究可重构计算相关的技术，重点在动态部分可重构技术的设计方法学和利用动态重构硬件完成高性能高效率计算。博士论文题目为《基于运行时计算模式的动态可重构硬件加速技术研究》。

2006.03 - 2009.07. 在网易有道兼职实习期间，负责搜索引擎中核心的倒排数据库模块的重构以及性能优化，积累了大型项目的开发以及团队合作的经验。

2007年8月到10月在英国帝国理工学院计算机系统结构实验室短期访问时，完成Linux内核程序的设计和实现，用于分析应用程序的运行时特性。

2010年10月到2011年11月再次到帝国理工学院计算机系统结构实验室长期访问期间，完成了基于Pin tool的目标应用程序动态运行时特性分析软件系统，能够图形化的展示目标应用程序的运行特性，服务于软硬件移植及性能优化。

2012年主持并完成了某部门固定资产投资管理的网上电子政务系统。

2013年主持并完成了某社区党组织电子积分档案系统。这两个都是浏览器加服务器构架的网络政务办公系统，需要整合信息管理，并且适应多变的业务流程。

2012年参与某型号嵌入式在线网络数据流压缩模块的核心模块设计，并且完成了该模块的演示验证系统。通过FPGA硬件完成对智能电网监控系统中以太网络数据的监听采集和在线数据压缩。

2013年参与某型号存储芯片测试演示系统的设计和制作，负责嵌入式测试系统的全面设计，以及主控计算机的控制程序。主要功能是演示芯片的存储能力，和对芯片存储性能以及可靠性等参数完成自动化测试和统计分析。该系统具有可视化展示能力，支持主控计算机以交互式方法完成测试。

2014年10月27日开始至今，在清华大学信息技术学院能源互联网研究中心任职博士后，合作导师是曹军威研究员，主要从事能源互联网基础理论研究和电力装置的智能控制研究。

博士后期间发表的学术论文

[1] 曹军威，袁仲达，明阳阳，张华赢，能源互联网大数据分析技术综述，南方电网技术，2015年第9卷，第11期。

[2] Junwei Cao, Shuo Chen, Zhongda Yuan, Jifeng Lin, Underlay implementation of Named Data Networking, International Journal of Security and Networks, 2015.

[3] Bingbing Zhao, Zhongda Yuan, Junwei Cao, Huaying Zhang, Zhengguo Zhu, Senjing Yao, Voltage sag diagnosis using big data analysis, in 1st International Conference on Information Technologies in Education and Learning (icitel-15), published by Advances in Computer Science Research, 2016.

[4] 胡军，曹军威，张少杰，杨洁，袁仲达，电压不平衡跌落时动态电压恢复器的快速PLL策略，《南方电网技术》, 2016, 10(5)。

[5] 杨洁，曹军威，袁仲达，张少杰, 谢晔源，段军，李立，电力电子装置监控系统中基于FPGA的电力信号有效值大规模并行计算，中国电机工程学报，2016。

博士后期间完成的研究成果

[1] 张华赢，姚森敬, 胡子珩，曹军威，张少杰，袁仲达，等，一种用于DVR装置中检测SAG信号的方法和系统，中国专利公布号 CN104407198A.

[2] 张华赢，姚森敬，曹军威，袁仲达，杨洁,一种自适应校准采样直流偏置的FPGA 及智能控制装置,申请公布号，CN 105446135 A。

[3] 曹军威，袁仲达，杨洁，张少杰，一种DSP控制系统软件升级方法及装置，专利申请文号： KHP161110471.4。

[4] 曹军威，袁仲达，杨洁，张少杰，一种远程调试系统、方法及装置，专利申请文号，KHP161110035.4。

[5] 曹军威，袁仲达，张少杰，杨洁，一种可动态编程的信号检测电路及方法，

专利公布号，CN 105843120 A。

[6] 曹军威，袁仲达，张少杰，杨洁，一种用于程序死锁的保护电路，专利公布号，CN 105929811 A。

[7] 张华赢，姚森敬，曹军威，袁仲达，杨洁，张少杰，胡俊峰，一种电压跌落发生装置，专利公布号，CN 205484586 U。