





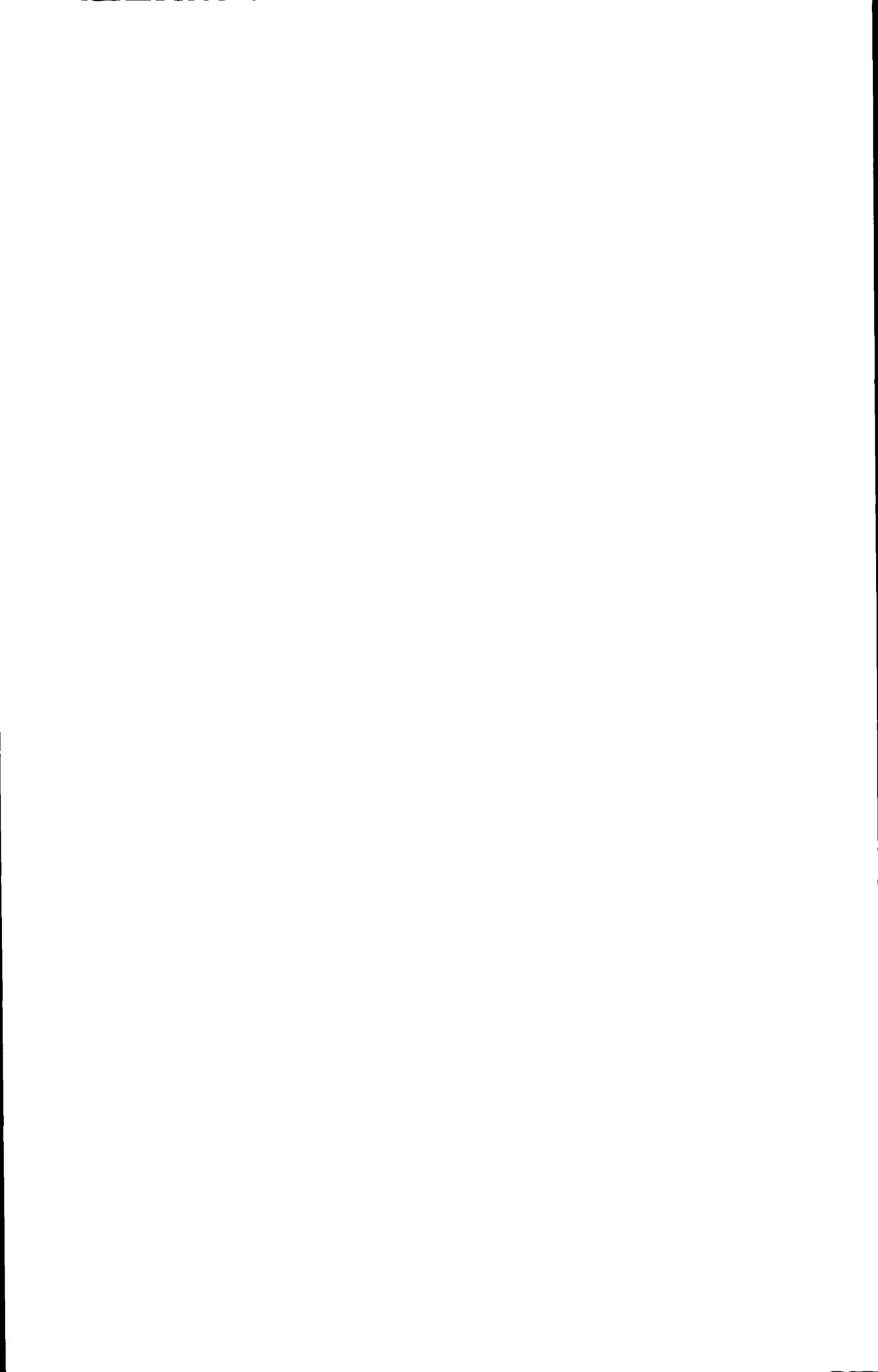
A Dissertation Submitted to Guangdong University of
Technology for the Degree of Master of Engineering Science

**The Research and Implementation of Power Load
Management Terminal based on DSP**

Master Candidate: Huang Huiqun

Supervisor: Associate Prof. Lian Yingzhan

June 2010
Faculty of Automation
Guangdong University of Technology
Guangzhou, Guangdong, P. R. China, 510090



摘要

随着社会与科技的快速发展,电力系统信息化、自动化及智能化程度不断提高,原先的电力负荷管理终端不能完全满足现有的电力负荷管理系统的需求。为了适应发展、满足需求,在负荷控制功能的基础上加强负荷管理、电力营销管理及客户服务等功能,增强电力负荷管理终端的功能及性能,促进了电力需求侧管理的发展。

本论文根据电力负荷管理终端新技术要求,采用了 AD 公司高性能、多任务的数字信号处理器 ADSP-BF533 及电力专用 A/D 转换器 AD73360 研制电力负荷管理终端。为使终端电路运行更稳定、更可靠及更安全,研究分析其电磁兼容设计,以保证终端在工作环境正常或异常电磁干扰下能够正常运行。电力负荷管理终端硬件设计主要包括数据采集、系统控制、数据显示、GPRS 通信与电源等电路模块;软件程序采用了 Visual DSP++ 集成开发环境研制系统软件,系统软件主要包括主程序、AD 采样程序、谐波分析程序、功控与电控程序及 GPRS 通信程序等;并且对信号采样及谐波分析算法进行优化,提高测量与监控的准确性。

电力负荷管理终端是电力系统信息化、自动化的必然趋势。终端综合应用现代电子技术、通信技术、网络技术与控制技术,对电力进行监视、控制及管理,提高供电质量、服务质量、提高企业的经济效益和管理水平,有更加广泛的应用发展前景。

关键字: 电力负荷管理终端; 数字信号处理; 快速傅利叶变换; 自动测试

ABSTRACT

With the rapid development of society and technology, the degree of automation, informationization and intelligence of power system continue to increase. The original power load management terminal can not fully meet the existing power load management system. In order to adapt the development and demands of power system, the power load management terminal is enhanced its functions and performance. It improves load management, power marketing management and customer service with the basis of load control functions, which promotes the development of the Power Demand Side Management.

In this paper, it develops the power load management terminal using a high-performance and multi-tasking Digital Signal Processor- ADSP-BF533 and a power dedicated A/D converter -AD73360 of AD company, according to the new technical requirements of power load management terminal. For the sake of running the terminal circuit more stable, more reliable and more secure, EMC is analyzed to ensure that the terminal runs normally in work environment under normal or abnormal electromagnetic interference. Hardware design in power load management terminal includes data acquisition, system control, data display, GPRS communications and power supply circuit modules and so on. The software program of the system is developed in Visual DSP++ Integrated Development Environment. It includes the main program, AD sampling program, interruption program, power control and electric control program and GPRS communication program and so on. In addition, the signal sampling and harmonic analysis algorithm are optimized to improve the accuracy of measurement and monitoring.

Power load management terminal is the inevitable trend of informationization and automation in the power system. It integrates the applications of modern electronic technology, communication technology,

network technology and control technology. To improve power supply quality, the Quality of Service, economic efficiency and management level of enterprises, it conducts the surveillance, control and management of the power. There will be more extensive development for the power load management terminal in the future.

Keyword: Power Load Management Terminal; Digital Signal Processing; Fast Fourier Transform; Automatic Detection

目录

摘要	I
ABSTRACT	II
目录	IV
CONTENTS	VIII
第一章 绪论	1
1.1 课题的研究背景与现实意义	1
1.2 国内外研究现状与技术分析	2
1.2.1 国外的研究现状	2
1.2.2 国内的研究现状与发展方向	3
1.3 论文的主要研究工作	5
1.4 本章小结	6
第二章 终端功能需求分析	7
2.1 终端技术指标	7
2.2 终端功能指标	8
2.2.1 数据采集	8
2.2.2 远程抄表	8
2.2.3 负荷控制	9
2.2.4 监测及告警	9
2.2.5 远程升级与维护	9
2.3 本章小结	10
第三章 终端硬件设计	11
3.1 硬件总体设计	11
3.2 微处理器选型及其外围电路设计	12
3.2.1 微处理器选型	12

3.2.2 微处理器主要外围电路设计	13
3.3 数据采集模块设计	15
3.3.1 AD73360 交流采集电路	16
3.3.2 直流模拟量采集电路	18
3.3.3 数字电能表采集电路	19
3.4 通信模块设计	20
3.4.1 GPRS 通信模块	20
3.4.2 红外通信接口电路	23
3.4.3 USB 接口扩展电路	23
3.5 控制电路模块设计	24
3.5.1 遥信电路	24
3.5.2 遥控电路	24
3.6 人机交互接口电路设计	25
3.6.1 按键电路	25
3.6.2 LCD 显示接口电路	26
3.7 电源电路设计	27
3.7.1 电源总体设计结构	27
3.7.2 直流稳压电源	27
3.7.3 电源输入预处理电路	28
3.7.4 变压整流和滤波稳压电路	29
3.8 硬件抗干扰设计	29
3.9 本章小结	32
第四章 终端软件设计	33
4.1 程序软件开发环境	33
4.2 软件总体结构设计	33
4.3 程序功能模块设计	34
4.3.1 AD73360 交流采集模块设计	34
4.3.2 通信模块设计	37
4.3.3 功控与电控程序设计	40

4.3.4 采样中断程序设计	41
4.3.5 人机互交程序设计	42
4.4 本章小结	42
第五章 终端应用算法分析	44
5.1 基本电参量算法	44
5.1.1 电流有效值	44
5.1.2 电压有效值	45
5.1.3 有功功率	45
5.1.4 无功功率	46
5.1.5 相位差	47
5.2 基-2的快速傅利叶算法	47
5.2.1 离散傅利叶变换	47
5.2.2 基-2快速傅利叶算法原理	49
5.3 交流采样及谐波分析算法优化	51
5.3.1 采样频率选择	51
5.3.2 锁相倍频同步采样	52
5.3.3 “异常点”消除	53
5.3.4 基 2-FFT 算法优化	53
5.4 本章小结	55
第六章 终端自动测试分析	56
6.1 终端自动测试	56
6.1.1 自动测试的必要性	56
6.1.2 自动测试环境	57
6.2 功能测试	58
6.2.1 数据采集测试	58
6.2.2 数据处理测试	59
6.2.3 测量功能测试	60
6.3 本章小结	61

结论	62
参考文献	63
攻读学位期间发表论文	66
独创性声明	67
致谢	68

CONTENTS

ABSTRACT in Chinese	I
ABSTRACT in English	II
CONTENTS in Chinese	IV
CONTENTS in English	VIII
CHAPTER 1 Introduction	1
1.1 The background and significance of research topics	1
1.2 Research and analysis in home and abroad	2
1.2.1 Research in abroad	2
1.2.2 Research and development status in home	3
1.3 The main work of thesis.....	5
1.4 Conclusion	6
CHAPTER 2 The Functional Needs Analysis of Terminal	7
2.1 Specifications of the terminal	7
2.2 Function index of the terminal	8
2.2.1 Data acquisition and analysis	8
2.2.2 Remote meter reading function.....	8
2.2.3 Load control	9
2.2.4 Monitoring and alarming.....	9
2.2.5 Remote upgrade and maintenance	9
2.3 Conclusion	10
CHAPTER 3 The Hard Ware Design of The Terminal	11
3.1 The overall structural of hardware design.....	11
3.2 Microprocessor selection and its peripheral circuit design.....	12
3.2.1 Microprocessor selection	12

3.2.2 The main external circuit of microprocessor	13
3.3 Data acquisition module design	15
3.3.1 AD73360 AC acquisition circuit	16
3.3.2 DC analog acquisition circuit	18
3.3.3 Data acquisition circuit of digital power meter	19
3.4 Communication module	20
3.4.1 GPRS communication module	20
3.4.2 Infrared communication interface circuit	23
3.4.3 USB interface expansion circuit	23
3.5 Control circuit module design	24
3.5.1 Remote communication circuit	24
3.5.2 Remote control circuit	24
3.6 GUI circuit	25
3.6.1 Key circuit	25
3.6.2 LCD display interface circuit	26
3.7 Power supply circuit design	27
3.7.1 The overall structural of power supply	27
3.7.2 Power supply of DC	27
3.7.3 Pre-processing circuit of power input	28
3.7.4 Transformer rectifier and filter regulator circuit	29
3.8 Anti-jamming design of hardware	29
3.9 Conclusion	32
CHAPTER 4 Terminal Software Design	33
4.1 Software development environment	33
4.2 Design of software	33
4.3 Process function module	34
4.3.1 AD73360 AC acquisition module	34
4.3.2 communication modules	37
4.3.3 Power control and electric control programming	40

4.3.4 Sampling interrupt programming	41
4.3.5 GUI programming	42
4.4 Conclusion	42
CHAPTER 5 The Analysis of Application Algorithm in Terminal	44
5.1 The algorithm of basic electrical parameters	44
5.1.1 Current RMS.....	44
5.1.2 Voltage RMS.....	45
5.1.3 Active power calculation.....	45
5.1.4 Reactive power calculation	46
5.1.5 Phase	47
5.2 The Algorithm of 2-FFT.....	47
5.2.1 Discrete Fourier Transform	47
5.2.3 Principle of 2-FFT.....	49
5.3 AC sampling and harmonic analysis	51
5.3.1 Sampling frequency selection.....	51
5.3.2 PLL frequency synchronous sampling	52
5.3.3 Optimization method of outlier.....	53
5.3.4 Optimization algorithm based on 2-FFT	53
5.4 Conclusion	55
CHAPTER 6 The Analysis of Automatic Detection	56
6.1 Automatic detection	56
6.1.1 Necessity for automatic detection	56
6.1.2 The environmen of automatic detection	57
6.2 Function detecion.....	58
6.2.1 Detection of aata acquisition.....	58
6.2.2 Detection of data processing	59
6.2.3 Measurement function detection	60
6.3 Conclusion	61

CONTENTS

CONCLUSION 62

REFERENCES 63

PAPER OF AUTHOR DURING STUDING DEGREE..... 66

ORIGINAL STATEMENT 67

ACKNOWLEDGEMENTS..... 68



第一章 绪论

1.1 课题的研究背景与现实意义

电能是社会生产、发展进步和人民生活所必需的最重要能源之一，对电能的管理及控制关系到国家乃至世界的发展和未来。建国以来，我国电力工业的发展取得了举世瞩目的成就，尤其是改革开放以来，电力工业得到迅速发展。但是，国民经济的飞速发展和人民生活水平的提高加剧了对电力供应的需求，电力工业的发展和科学技术水平的提高，对电力负荷管理终端也提出了更高的要求，但同时也提供了更好的技术支持和条件。这就促使电能管理配置由间接控制发展到直接控制、从简单的分散型管理发展到复杂的集中管理、从“控制”的初级阶段发展到“管理”的高级阶段^{〔1〕〔2〕}。

20世纪初，政府和电力相关单位都提出了用相应的政治及经济措施鼓励用户均衡用电，用技术措施控制和管理那些可间断供电的用电设备，从而降低峰谷用电负荷差、优化负荷曲线、保持电网处在经济、稳定、安全的运行状态。电力供求关系的矛盾固然可以通过新建电厂，增加装机容量的方式来解决，但这种方法不但需要大量投资，而且存在环境和生态问题，并不能从根本上解决存在的问题^{〔3〕}。因此有必要寻求一种更为科学、有效的方法解决这一矛盾。从长远看，增加电力供应是解决电力供需矛盾的根本途径，但在短期内，深度挖掘电力系统现有资源，进行更合理的调度、高效的利用则是当务之急，因此必须提高电力负荷系统的管理水平。因而，研究并开发新型的高技术含量、适应需求的电力负荷管理终端也就成了重中之重，这才能提高用电效率和更好的为电力用户提供更好的服务，从而进一步加强电力需求侧管理(Demand Side Management, DSM)^{〔4〕〔5〕〔6〕}。

电力负荷管理系统是在先前的电力负荷控制系统的基础上发展起来的，后者以对电力负荷进行当地闭环控制和远方遥控为主要功能。随着电力供需矛盾的缓解，电力负荷管理系统的作用逐步转向了建立正常的供用电秩序、保障电网安全、高效营配、高度的资源统一管理等方面。系统增加了用电管理功能、信息服务及管理功能、远方抄表功能、防窃电功能、

购电控制功能、电压合格率监测等功能^[110]。这些功能的扩展,将为电力企业带来巨大的经济效益,也提高了电力负荷管理系统的经济价值和生命力。该系统的数据处理方面也打破了以前数据处理的局限性,拓展了网络功能。这些功能及技术对于电力系统负荷预测、用电分析、电能质量分析、发电计划的制定和电力系统的发展规划,具有重大的作用和意义。

电力负荷管理终端(简称:终端)是电力负荷管理系统的一个重要组成部分,它在对大电力用户的监控、对电源和网点的监控、对专用配变和公用配变的监测管理、以及远方集中抄表系统等场合已得到了广泛应用^[111]。通过电力负荷管理终端对电力负荷的管理和控制,可以有效的改善负荷曲线形状,使负荷曲线趋于平坦、减少峰谷差,实现电力负荷在一定时空的最佳分布。从而提高电网和用户的负荷利用率、提高发电、供电及用电设备的利用率、提高能源投资效益,保证电网的安全、经济及高效运行,对发电、供电单位和电力用户以及整个社会发展都有很大好处。

国民经济的高速发展及电力负荷的快速增长,对电力负荷的管理和控制,在电网调度中的作用越来越重要。所以,设计开发出能保证电力负荷管理系统高效、稳定、准确、安全运行的电力负荷管理终端的软、硬件系统日显重要。社会的不断发展、服务意识的不断提高,电力业务网络化及智能化的呼声越来越高。通过电力负荷管理终端进行管理和控制,形成智能化管理、提高管理水平、减少劳动强度是电力负荷管理未来发展的必然选择。国家政府和电力管理部门通过有效的经济、技术手段或行政手段,鼓励企业自愿参与需求侧管理,到达节约能源、增加效益、保护生态的可持续发展的目标,最终实现整个社会的和谐、健康发展^[112]。

1.2 国内外研究现状与技术分析

1.2.1 国外的研究现状

电力负荷控制终端最先是在欧洲得到广泛的研究及应用。20世纪30年代,英国开始研究并应用音频电力负荷控制技术。早期音频电力负荷控制系统的音频信号是由高频旋转电机产生的,主控机和接收机采用常规机械电子机构,系统工作效率不高,控制管理的电力用户数量也受到限制。

随着电力电子技术的发展，可控硅换流技术的出现和计算机技术的广泛应用，使现代的音频电力控制系统用计算机代替了过去的机械电子式中央控制机，可控硅静态换频器成为音频信号发生器，以微处理器为基础构成的接收器取代了机械电子式接收机。现代音频电力负荷控制终端在功能、价格和可靠性等方面，都远远超过了早期的音频电力负荷控制终端。因此，现代音频负荷控制系统在世界各国得到了普遍使用。

20世纪60年代后期，美国研制和应用了电力线载波负荷控制终端。到20世纪70年代初，已有4个电力公司现场使用该终端，电力负荷控制点为8.8万个。美国在引进音频控制技术后，即开始研制和发展了无线电力负荷控制技术。至1978年，美国就已有24个供电企业装设无线电力负荷管理系统，电力负荷控制点可达到50多万个。在这之后，美国还有些电力公司使用了无线电、电力线载波及音频相结合的电力负荷管理终端，这是基于公共移动网新型数据传输组网技术发展而建立的新型电力负荷管理终端。目前，世界上已有几十个国家使用各种类型电力负荷管理系统，安装的电力负荷管理终端数量达到几千万台，可控制和管理的电力负荷覆盖面占世界发电设备总装机容量的30%以上^{[1][2]}。

1.2.2 国内的研究现状与发展方向

1.2.2.1 研究现状分析

我国电力负荷管理技术发展经历了从间接控制到直接控制，从分散控制发展到集中控制管理的过程。从20世纪50年代，随着工业的大规模发展，部分地区出现电力供求关系紧张开始，电费支出成本中的所占比例上升，峰谷电价逐渐失去作用。国家从计划用电的需求出发，从20世纪50年代初开始推广电力定量器和定时开关等分散型电力负荷控制设备^[3]。

随着国家及电力单位推出相应的政策和措施，电力负荷管理终端及其相关技术得以推广应用，对落实计划用电起到积极作用。从1978年开始，国务院有关部门正式组织一些单位对电力负荷控制技术进行研究，主要是欧洲国家的音频和工频及无线控制技术。经试用表明，完全引进国外的技术和电力负荷管理终端设备不能满足我国实际需求。后来，国家正式确定了石家庄、济南、郑州和南通四城市分别为音频和工频及无线电力负荷控

制终端及系统的试点。结果表明,无线电力负荷控制系统组网较方便,与电网一次系统无紧密连接,效果较好。经过十几年的研究开发,已初步研制出适合我国国情的无线、音频、载波、工频方式和分散型的电力负荷控制装置,由于我国电力负荷控制及管理的特殊性,预示 GPRS(General Packet Radio Service)无线电力负荷管理技术在一段时间内将占主导地位,而基于 DSP(Digital Signal Processing)的 GPRS 无线电力负荷管理终端是最具技术代表性、发展潜力的电力负荷管理系统的设备终端^{〔16〕〔17〕}。

1.2.2.2 技术发展方向

电力负荷管理终端是整个电力负荷管理系统的核心设备之一,其完成功能及需求范围、应用程度的深浅,将是影响电力相关部门工作效率、电能利用率、电力行业服务质量的重要因素。从目前大部分电力负荷管理终端应用的状况来看,有的功能在逐渐发挥作用,而相当一部分功能还有待去应用及完善,这将是我国电力负荷管理终端研究应用的重要任务之一。实际上,到了 90 年代中后期,国家电力行业迅猛发展,电力市场供需矛盾基本解决,对负荷的控制要求不断减弱,而对综合管理功能提出了更高层次的要求^{〔18〕}。电力负荷管理终端也不仅仅是单纯用来限电,增加了用电管理新功能,其中包括远程抄表、预购电、防窃电、用电质量监测、负荷控制、用电信息服务、控制地方上网电厂等功能。而这些新功能将为电力企业带来巨大的能源效益和经济效益,也提高了电力负荷管理系统的经济价值和生命力。

同时,随着我国经济的快速发展,对能源的要求越来越高,而电能是其中最为重要的能源之一。先前的电力负荷管理系统不能完全适应现代电力发展的要求,国家发改委和电监会提出要研发新型的电力负荷管理系统及其相应的技术规范,其中一个重要的环节就是新型电力负荷管理终端的研发^{〔19〕}。同时,数字信号处理技术、电力电子,自动化技术、计算机技术以及通信技术的快速发展和应用,为新型的电力负荷管理终端的研发提供了有力的技术保障和支持。

电力负荷管理终端是信息化高度发展的产物,担负着电能量的采集、存储、计算和发送等任务。随着技术进步对终端也提出更高的要求,不但增加了很多新的功能,其计算速度和准确性也有很大程度的提高。我国电

力工业走向市场,实现商业化运营已成为趋势,建立以电力负荷管理终端为基础的电力负荷管理系统,提高电能量采集、传送、处理的精确性、唯一性、可靠性和及时性,是实现电力工业商业化运营的迫切要求^{[19][20]}。

我国的电力负荷管理终端技术推广应用虽晚,但近几年发展迅速。各种新型的电力负荷管理终端也不断研制出来,如国内广东中钰科技有限公司自主研发的 zy300 电力负荷管理终端,已在多个省、市级电网内使用,并取得很好的源源效益、经济效益和社会效益。该终端建立在现代数字通信、计算机软硬件技术、电子技术、电能计量技术和电力营销技术基础上,并通过 GPSR 网络通信方式实现终端和系统主站之间的数据通信^[21]。该终端具有远程抄表、用电异常信息报警、电能质量测试、线损分析、负荷管理和控制、居民集中抄表、变电站集中抄表等多种功能。

电力负荷管理终端是实施计划用电、节约用电、安全用电的技术手段基础,它将在电力管理现代化实现的进程中起到越来越重要的作用。电力负荷管理终端将会促进实现电力企业生产自动化管理到电网现代化经营、决策管理的转变,也是实现电力营销现代化管理的需要^[22]。相信,电力负荷管理终端将会得到更加迅速的发展和更为广泛的应用。

1.3 论文的主要研究工作

现有的电力负荷管理终端产品,普遍采用8、16位微处理器单片机、运算速度较低、硬件性能较差、兼容性差、软件资源也非常有限,在实际应用中主要用于远程抄表,功能较为单一化。通信方式一般采用电力载波、电话线和无线电台等方式,这些通信方式普遍存在可靠性差、维护困难等缺点。所以不能满足当今电力市场的飞速发展、电力资源优化和电力负荷管理系统的网络自动化的需求。

本论文主要通过对电力负荷管理系统及终端设备的研究,借鉴国内外研制的同类终端设备的开发经验,研究开发一种新型的电力负荷管理终端,能够基本解决现有同类产品存在的各种问题,以适应新型电力负荷管理系统的发展需求。具体研究内容包括以下几方面:

(1) 根据电力工业的发展给电力负荷管理系统及终端设备带来的新需求,明确提出所要开发的电力负荷管理终端应具备的功能配置和需要达到

的性能要求，从而确定电力负荷管理终端的结构以及实现方式。

(2) 对不同微处理器及A/D转换芯片的性能进行分析和比较，根据电力负荷管理终端所要求达到的功能和性能要求完成主要芯片的选型。

(3) 根据性能技术要求对电力负荷管理终端进行硬件电路设计，在设计过程中注重硬件抗干扰技术的运用，对其中的关键电路进行软件仿真，然后制作电路板并对相关功能进行调试。

(4) 分析和比较要完成电力负荷管理终端各项功能所需要用到的各种软件算法，包括交流采样算法、无功补偿控制算法、脉冲量采集算法及谐波分析算法等。

(5) 根据电力负荷管理终端需要实现的功能要求和硬件电路，完成各个软件模块的设计和调试。

(6) 采用自动测试技术对终端功能进行测试，提高其规范性及兼容性。

1.4 本章小结

本章简述了中外电力负荷管理终端的发展状况及相关技术、和发展趋势。主要分析了国内电力负荷管理终端的发展现状、研发的现实意义和作用，明确了新型电力负荷管理终端在电力需求侧管理中的重要性、研发和应用的必要性以及研发过程中的工作重点和创新之处。

第二章 终端功能需求分析

电力负荷管理终端(简称:终端)采用 GPRS 无线通信方式,以公共的 GPRS 移动通信网络为载体,辅以现场 RS485 总线、RS232 及 USB 等通信方式,以变电站、大用电客户、公共配送电、居民用户等为主要控制、管理对象,是集遥测、遥信、遥控(三遥)功能为一体,具有可靠性高、容量大、兼容性好、稳定性强等特点。能够遥测包括母线、电表各类电气参数,对相关用电信息进行监测、管理,实现从变电站到供电线路再至电力用户的综合供求的用电监测、控制和管理,具有远程抄表、集中抄表、用电异常信息告警、负荷管理与控制等多种功能。

2.1 终端技术指标

中央处理器: ADSP-BF533 高速数字信号处理器

供电电源: 三相四线 220/380V 或三相三线 57/100V 频率: 50Hz

数据计量类型: 电量、瞬时量、费率、需量、合格率、极值等

掉电数据保存时间: 10 年以上

存储容量: 4M(16 位) Flash , 64M SDRAM(均可扩展)

下行数据接口

接口类型: 1 路 RS485 通信接口

连接方式: 每条 485 通道最多可接 16 块电能表,同一通道可以连接不同协议的电能表

通信速率: 300bps~28800bps

通信协议: 威胜、EDMI、ABB、兰吉尔等协议

上行数据接口

接口类型: 1 个 SIM 卡口, 1 个 USB 口, 1 路 RS232, 1 路红外 IrDA

远程连接: GPRS/CDMA/GSM/230M 无线通讯接口(可配置)

通信协议: 电力负荷管理系统数据传输规约,并可扩展协议

用户接口: 液晶显示屏(中文菜单), 按键按钮

维护方式：可远程维护和本地维护

软件升级方式：支持远程升级终端软件和参数配置文件

时钟精度： $\pm 1 \text{ s/d}$ 对时精度： $< 1 \text{ s}$

数据采集成功率： $\geq 99.9\%$ 系统可靠性： $\text{MTBF} \geq 50000 \text{ h}$

电气安全防护：防雷(电源、通信接口)、抗震和电磁兼容设计

2.2 终端功能指标

电力负荷管理终端的基本功能应有：数据采集分析、远程抄表管理、负荷控制、监测及告警功能及远程升级维护等。

2.2.1 数据采集

终端数据采集包括交流采样、脉冲采集、直流采集以及电能表数据采集。采集的各类数据和测量数据，主要包括：正、反向有功电量总、尖、峰、平、谷；四象限无功电量、用电需量、电压、电流、有功功率、无功功率及功率因数和电表运行状态数据等。终端应能实现采集一条线路的三相电压和三相电流，测量线路的三相电压、电流、功率因数、相位等，并具有统计每天和每月的最高最低电压及发生时间、最大最小电流及发生时间、最大需量及发生时间等功能。

2.2.2 远程抄表

终端能通过 RS485 总线通信接口对连接在 RS485 总线网络上的各种智能电表进行数据抄读和参数设置，并将抄读到的电表数据上报给主站，主站可通过服务器数据共享方式将电表数据传送给计量收费部门，实现远方自动抄表。相反，终端也能将中心站发来的电表设置命令用转发方式送给电表，实现远方设置表的参数。系统可定时和随时抄录远方数据，也可定制计划任务，由终端主动上传给采集服务器。

2.2.3 负荷控制

负荷控制，又可称为负荷管理，可动态监测用户电力负荷，为电力需求侧管理提供准确、及时的电力负荷数据，根据需要通知客户并通过拉闸进行控制负荷。其主要作用是用来碾平负荷曲线，从而达到均衡的使用电力负荷，提高电网运行的经济性、安全性，以及提高电力企业的投资效益的目的。

2.2.4 监测及告警

监测与告警是指系统各监测点应能监测负荷、电能量、抄表状况、工况、电能质量等数据，当发生异常时应能产生告警并记录事件，以供相关单位或用户及时处理。报警的方式除文字、图像、声音外，还应支持短消息、Email 等远程告警方式。报警信息应能按定义的业务流程进行流转，以便相关人员及时处理和反馈。利用终端设备的存储功能将计量曲线和保护回路曲线存在终端内，在每天设定的时间进行日数据遥测时，将数据曲线取回并进行比较分析。

实现用电实时监测(防窃电管理)、表计异常告警、通讯异常告警和用户自定义告警。监控用电方计量柜、电表用电异常情况，一旦出现窃电情况，对异常情况告警，并记录发生时刻及恢复时刻。根据错峰、避峰管理需要以及大用户的用电计划，进行用电上下限额设定。当实际用电数据超过上下限额，则自动发出告警信息，并提供一定的负载控制功能(如：支持图形、文字、声音告警)，同时可根据用户设置进行告警。

2.2.5 远程升级与维护

终端应能支持系统编程和在线编程两种软件编程方式。系统编程即是本地下载，是由专用终端编程器通过终端主板上的本地编程接口直接对 Flash 编程，整个程序的烧写只需几十秒。在线编程即是远程下载，由主站通过远程通信信道，在终端正常运行的同时对终端进行在线软件下载，主要是在终端已大量安装在现场时，需要软件更新升级时使用。

2.3 本章小结

本章简述电力负荷管理终端的技术指标要求，并对其基本功能与特性进行分析。主要对终端各主要功能进行描述及分析，从而更好明确各相应的功能的硬件与软件的设计方式及相关技术问题，为终端的硬件、软件功能的研究与实现打下良好的基础。

第三章 终端硬件设计

3.1 硬件总体设计

在终端硬件设计中,中央微处理器采用 AD 公司的 32 位高速数字信号处理器(DSP)ADSP-BF533,配合大容量的存储器及 16 位高速、低功耗、6 通道同步高精度的数据采集芯片 AD73360 进行设计。而且,在设计上充分考虑硬件功能的安全性、稳定性及可扩展性。

终端的硬件总体结构如图 3-1 所示,正常工作时通过计量芯片采集电网电流、电压,并计算线路有、无功功率、功率因素等数据,并通过 RS485 通信接口读取电能表采集到的用电数据,然后通过 GPRS 无线通信模块将数据上报给主站,同时通过终端的液晶模块显示终端的采样数据、通信方式、工作状况等情况。为了减少在信号处理过程中频谱泄漏对谐波分析的影响,提高谐波分析的精确度。系统采用基 2-FFT 算法(Fast Fourier Transform Algorithm)对电流、电压波形数据进行频谱分析,分离出基波分量及 2~21 次谐波分量,利用微处理器的高速处理能力完成电参量的测试及谐波分析等任务。

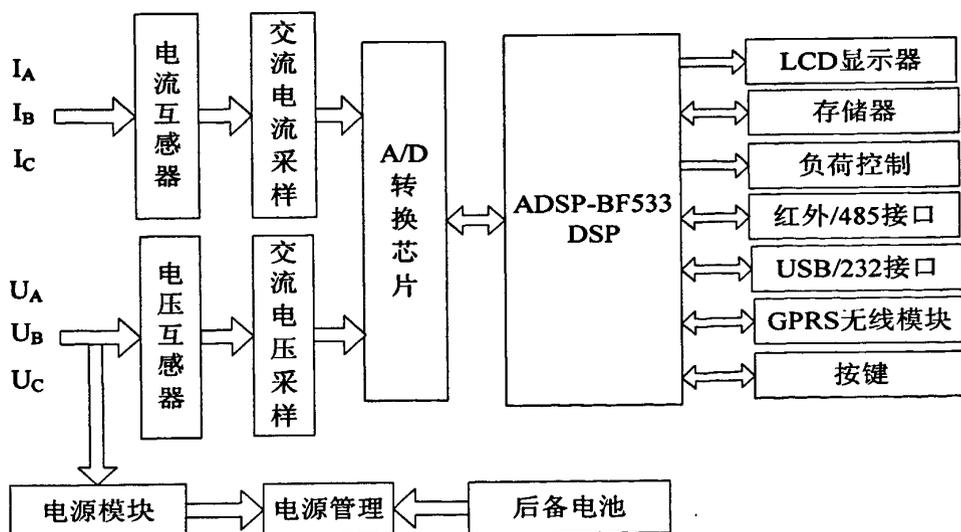


图 3-1 电力负荷管理终端总体结构

Fig.3-1 The overall structure of power load management terminal

终端硬件工作原理如下:微处理器 DSP 主要是协同 A/D 转换芯片完成

数据的采集与处理、数据或指令接收和发送、GPRS 通信模块的驱动、其它接口驱动及协议转换。当用户需要采集模拟量输入或者需要对 I/O 口进行操作的时候,主站通过 UDP 协议将一帧数据通过 GPRS 无线通信网络发送到 DSP。微处理器接收到指令以后,先将其解包品并完成相关的操作。终端根据中心站发下的参数,通过电能计量表传来的数据的接收,计算出有功功率、无功功率、有功电量、无功电量及最大需量并显示及回传主站。通过电压、电流变送器送出的模拟量,计算出电压和电流,通过被控开关辅助接点送出的开关信号,测试开关的“分”、“合”状态,然后再将返回数据进行封装工作,最后返回给主站。

另外,终端各不同模块的供电采用独立的电源模块,具有较高的可靠性。主控板中央处理器采用高性能 32 位数据处理器,实时运算处理能力很强,且配有不掉电工作 RAM 和高性能 CPU 监控芯片,设备工作稳定可靠,在掉电的情况下也不会丢失数据。同时,采用了页面管理技术,配有大容量 FLASH 存储器,可进行大批量数据存储。

3.2 微处理器选型及其外围电路设计

3.2.1 微处理器选型

本终端的中央微处理器是采用美国 AD 公司的 32 位高速数字信号处理器 ADSP-BF533,其融合 Analog Devices/Intel 微信号结构 (Micro Signal Architecture, MSA)。该处理器运算速度高达 600MHz,是一款高性能 Blackfin 系列处理器,并且支持嵌入式操作系统。ADSP-BF533 微处理器主要结构特点如下^[12]:

- 16 位定点 DSP 内核,可以实现以频率 600MHz 持续稳定工作。
- 该内核包含 2 个 16 位乘法器、2 个 40 位的累加器、1 个 40 位移位器。其运算单元处理来自寄存器组的 8 位、16 位或者 32 位数据。每个 MAC 每周期可完成一个 16 位乘以 16 位的乘法运算,并把结果累加到 40 位的累加器中。
- 存储结构采用 4GB 统一寻址空间,所有的存储资源都被映射到统一的 32 位地址空间。其中, L1 指令存储器包括 80K SRAM,其中 16KB 可

配置成 4 路组联合 Cache。L1 数据存储器包括 2 个 32KB SRAM 的 U 数据 SRAM，访问速度与 L1 存储器同样为处理器最快速度，不可配置为 Cache。同时还支持片外同步或异步存储器。

- 灵活的引导方式 (SPI 或内部、外部存储资源)。具有 RTC(Real Time Clock)模块、Watch Dog 定时器以及 3 个支持 PWM 输出的定时/计数器。
- 周边接口资源包括 16 个 GPIO、1 个支持 IrDA 通用异步串行口 (UART)、并行外设接口支持 ITU-656 视频数据格式、1 个 SPI 兼容端口、2 个双通道、全双工同步串行接口、8 个立体声 1²S 通道、12 通道 DMA(Direct Memory Access)。
- 片内自带 1~63×PLL，0.7~1.2V 内核电压，3.3V 输入输出电平。

Blackfin 处理器汇编语言使用易于编程和可读性强的代数语法，灵活的控制动态电源管理，而且在和 C/C++编译器的链接上进行了优化，给程序员提供了快速有效的软件环境。该处理器结合了 Intel 公司的 RISC 处理器和 AD 公司的 DSP 技术，从而既保证了工业控制处理的实时性和灵活性，又保证了交流采样、电能计算的准确性。同时也为将来实现需求侧管理、电能质量监测的深入提供了保证。

3.2.2 微处理器主要外围电路设计

微处理器 DSP 外围电路设计主要部分是：晶振时钟电路、系统复位电路、电源电路、片外存储电路等。

3.2.2.1 晶振时钟电路

ADSP-BF533 处理器可以使用来自外部的晶振正弦输入，或经过缓冲整形的外部时钟输入。本设计中采用外部时钟输入，直接从 CLKIN 输入，另一个引脚 XTAL 悬空。通过可编程 1x 到 63x 的倍频因子 (由最小和最大 VCO 频率决定)，可使片上 PLL 倍频 CLKIN 信号。默认的倍数为 10x，但可以通过软件指令改变。DSP 晶振时钟电路如图 3-2 所示。

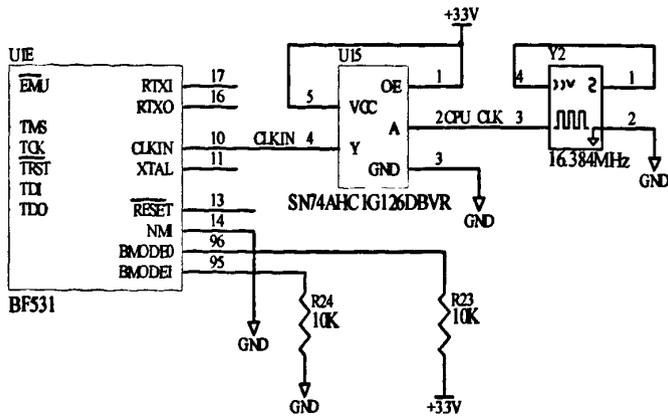


图 3-2 晶振时钟电路

Fig.3-2 Crystal clock circuit

3.2.2.2 系统复位电路

ADSP-BF533 提供一个 32 位的定时器，用于执行软件的“看门狗”功能，以提高软件可靠性。同时 DSP 也有一个硬件复位引脚，当输入宽度超过 11 个 CLKIN 周期的低电平时，硬件复位 DSP。终端的复位电路设计采用一片专用的监控集成芯片 IMP706R。通过该复位芯片可以监测看门狗输入信号/WDI 或手动方式对 DSP 和 FLASH 存储器进行复位，可以实现系统的复位功能。终端系统复位电路如图 3-3 所示。

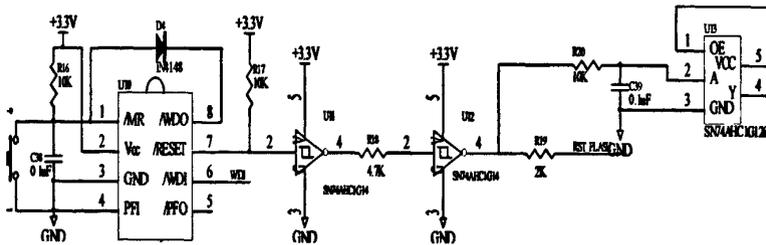


图 3-3 系统复位电路

Fig.3-3 System reset circuit

3.2.2.3 片外存储电路

ADSP-BF533 微处理器把存储器视为一个统一的 4GBytes 地址空间，使用 32 位地址。所有的资源包括内部存储器、外部存储器和 I/O 控制寄存器都占据公共地址空间各自独立的部分。全部地址空间的各部分存储器按分级结构排列，以提供高性价比，其中一些快速、低延迟的存储器（如 CACHE 或 SRAM）的位置非常接近处理器内核，而更大的低成本、低性能的存储器离处理器较远。

L1 存储器是 Blackfin 处理器内核中性能最高及最重要的存储器。通过外部总线接口单元 (External Bus Interface Unit, EBIU), 片外存储器可以由 SDRAM、FLASH 和 SRAM 进行扩展, 可以访问多达 132 MBytes 的物理存储器。它们的总线宽度均为 16 位, 8 位的外围设备必须跟 16 位的设备一样分配 16 位地址, 但只使用其低 8 位数据。SDRAM 控制器可以通过编程与高达 128MBytes 的 SDRAM 接口。内部最高可以配有 4 个 SDRAM Bank, SDRAM 控制器允许为内部 SDRAM 的每个 Bank 同时打开一个通道, 从而提高系统性能。ADSP-BF533 可以配置一个 Bank 的 SDRAM (最大可达 128M BYTE), 4 个 Bank 的异步存储器 (每个 Bank 提供 1M BYTE)。

3.2.2.4 电源电路

ADSP-BF533 处理器电源主要有两个: 内部 (内核) 供电电压 (VDDINT) 与外部 (I/O) 供电电压 (VDDEXT), 两者电路如图 3-4 和图 3-5 所示。前者标称电压为 1.2V (最大供电电流为 150mA), 电压范围为 0.8~1.32V。后者标称电压为 3.3V, 电压范围为 2.25~3.6V。在终端硬件设计中, 采用 3.3V 供电, 而内核电压采用 Blackfin 处理器提供的片上调压器, 它可以使外部 2.25V~3.6V 供电电压产生处理器内核电压 0.85V~1.2V。

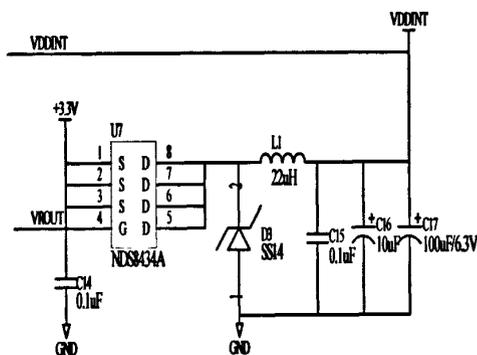


图 3-4 内核电压供电电路

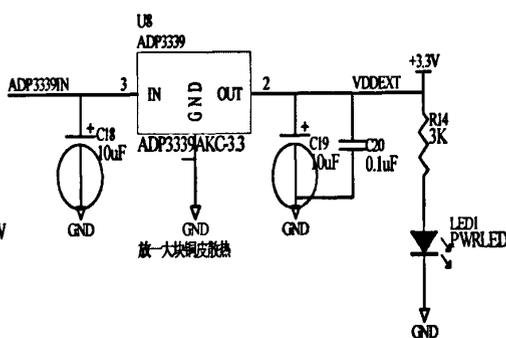


图 3-5 外部 I/O 供电电路

Fig.3-4 Core voltage power supply circuit Fig.3-5 External I/O power supply circuit

3.3 数据采集模块设计

数据采集是整个终端设备信号处理分析的核心之一。它的采集精度和方式直接影响到电能计算的精度、谐波的分析准确度、状态判断及动作执行的可靠性。该部分使用处理器 I/O 接口, 接收由电网或监控对象所引入的三相电压、电流、遥信、遥测、遥控、脉冲、RS485 接口等经光电隔离

或 A/D 转换后的信号，完成各自功能数据的采集处理和数据参数的下发，并利用微处理器发出相应的响应信号输出。

3.3.1 AD73360 交流采集电路

3.3.1.1 交流采集芯片 AD73360 简介

交流采集芯片 AD73360 具有六个模拟量输入通道，每个通道可以输出长度为 16 位的数字量。各采集通道可提供 76dB 信噪比，允许从直流到 4KHz 的模拟信号通过，具有较强的抗干扰能力。这 6 个通道可同时采样，并且无须 CPU 干预，从而有效地减少了由于采样时间不同而产生的相位误差。各个通道采样速率可以方便地利用控制字在 8KHz、16KHz、32KHz 和 64KHz 中进行选择设定。由于各个通道都有内置的反混迭滤波器，所以对其输入端反混迭滤波器的要求大为降低，而仅需要简单的一阶 RC 滤波器即可满足要求。AD73360 则在前端设计了信号调理模块，允许用户输入信号为单端或差动形式，可以有效减小外围电路设计的难度和复杂程度。交流采集芯片 AD73360 的主要引脚功能：

- SCLK: 是串行时钟输出端口，作为 A/D 转换器的输出传送到中央微处理 DSP 同步串行接口时钟输入(接收时钟信号 RSCLK0 与发送时钟信号 TSCLK0)，用来协调或控制二者之间的数据传送速率。
- SDIFS: 是 AD73360 的帧同步输入端，高电平有效，其宽度为一个 SCLK 周期，并且同步于 SCLK 的负沿。
- SDOFS: 是 AD73360 的帧同步输出端，高电平有效，其宽度为一个 SCLK 周期，该输出同步于 SCLK 正沿。
- SDI 和 SDO: 分别为 A/D 转换器数据输入和输出接口，直接与 DSP 同步串口的数据输出与输入接口相连。
- SE 和 /RESET: SE 为片选信号，高电平有效。/RESET 为其复位端，低电平有效。这两个引脚通过微处理器 ADSP-BF533 通用 I/O 来进行控制。
- VINP1~VINP6 与 INN1~VINN6: 模拟量输入共占用 12 根引脚，其中 6 根正输入端标记为 VINP1~VINP6, 负输入端标记为 VINN1~VINN6。
- REFOUT: 是带缓冲的基准电源输出端。使用 5V 电源时，其额定值为 2.5V; 使用 3.3V 电源时，其额定值为 1.25V。

- MCLK: 作为主时钟输入端, MCLK 信号由外接的 16.384MHz 石英晶体振荡器来驱动, 当 MCLK 进入 AD73660 之后, 首先被分频生成 DMCLK 称之为内部主时钟, 然后再将它分频生成 SCLK(系统时钟)。

AD73360 使用六线工业标准同步串行接口与微处理器 ADSP-BF533 相互连接通信。由于电力专用模数转换芯片 AD73360 具有六个同时采样的模拟量输入通道, 所以特别适合于三相制电力运行参数测控类应用(三个相电压和三个相电流同时采样)的系统。由于接口信号线的数目只有 6 根, 所以这样不仅节约了印制电路板面积, 而且也有效地减小电磁干扰, 从而使系统运行更加稳定^[14]。

3.3.1.2 交流取样电路

在电流取样电路中, I_{A1} 和 I_{A2} 是电流互感器二次侧的电流输入信号, 通过电流互感器 CT03-5/5 得测试电流再由 26Ω 的高精度(1%)的电阻转换成电压信号, 作为交流电流取样为交流采集模块提供电网电流信号。三个电容起滤波和平滑的作用。电流互感器的精度是 0.1 级。交流电流取样电路如图 3-6 所示。

在电压取样电路中, U_a 和 U_n 是电压互感器的输入信号, 也是工网电压信号。其中的 SMBJ5.0CA 是起到稳压和去尖脉冲的作用。电容的作用和电流取样电路是一样的。电压互感器的精度也是 0.1 级。交流电压取样电路如图 3-7 所示。

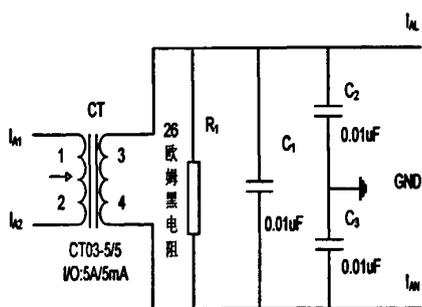


图 3-6 交流电流取样电路

Fig.3-6 AC current sampling circuit

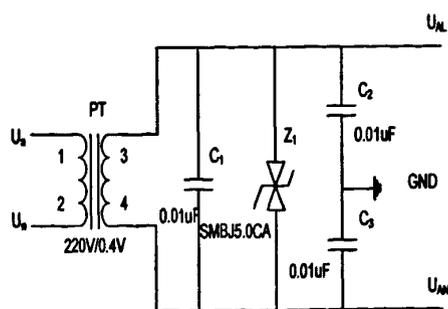


图 3-7 交流电压取样电路

Fig.3-7 AC voltage sampling circuit

3.3.1.3 AD73360 交流采集电路

为了获得三相工频信号之间的精确相位关系, 则须同时对三相电压和电流进行采样。如果同时采样同一个回路的电压和电流, 就需要同时采样

6路的电信号。因此在交电采集电路的设计中，采用AD公司的AD73360交流采集芯片，在A/D数据转换过程中延迟很小，非常适合三相电能的信号转换或采集。AD73360交流采集电路如图3-8所示。

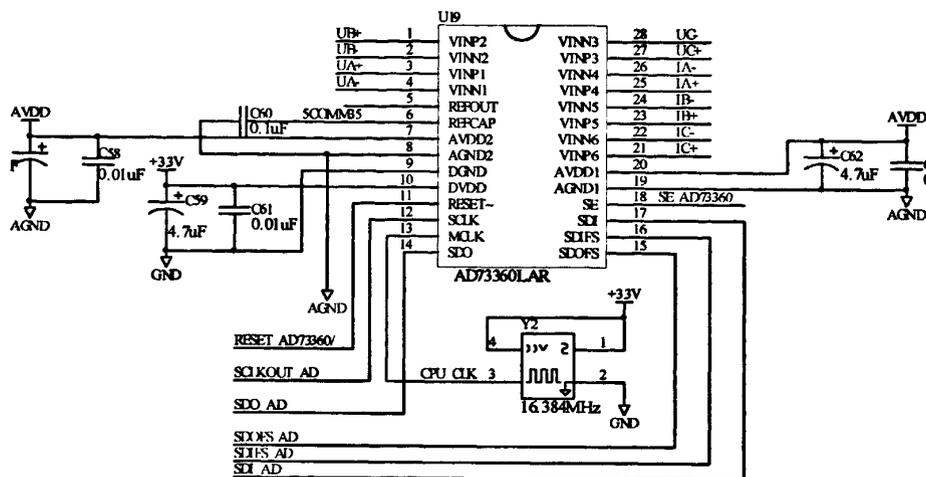


图 3-8 AD73360 交流采集电路

Fig.3-8 AD73360 AC acquisition circuit

AD73360 采集芯片与微处理器 ADSP-BF533 的 SPORT0 端口进行串行通信。ADSP-BF533 提供两个 SPORT 端口 (SPORT0 与 SPORT1)，而且 DSP 的串口 SPORT0 被设置为 DMA 传输方式，DMA 提供了一种在串口中断产生之前接收或发送一整块串行数据的机制，在整个缓冲区接收到指定的数据时，也会产生接收中断。这样的传输方式可以对整个数据块进行操作，而不是对单个数据字操作，从而大大减少了系统的运行开销。

为了实现终端各项功能和更好的利用和开发，在设计时将接收和发送帧同步信号连接起来，这时AD73360工作在主动模式下，而ADSP-BF533工作在被动模式。其串行时钟(SCLK)，接收(RFS)和发送(TFS)帧同步信号均由AD73360提供，使得接收和发送数据处于同步状态，这就避免了串行数据传输时复杂的时序控制。另外，AD73360有两种复位方式，无论是硬件还是软件复位，其复位信号均需要4个内部主控时钟。

3.3.2 直流模拟量采集电路

为终端的运行更加可靠而设计了直流模拟量的采集电路如图3-9所示，主要完成电池电压及环境温度的采样判断。采样芯片用的是ADS7830，采样范围是0~5V的直流模拟电压。

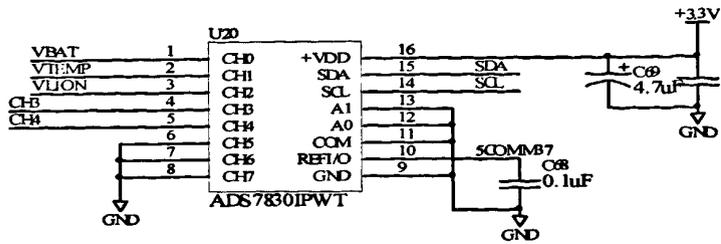


图 3-9 直流采集电路

Fig.3-9 DC acquisition circuit

3.3.3 数字电能表采集电路

利用终端对数字电能表的采集，我们通常叫抄表，抄表是电力负荷管理终端非常重要的功能之一，是通过 RS485 串口通信得以实现的。RS485 通信接口具有传输距离较长，传输可靠的特点，电子式多功能电能表一般都配置了 RS485 接口，并应用于电表与终端的通信。具有 RS485 输出接口的电子式多功能电能表是实现远方抄表和负荷监测的基础。数字电能表采集电路如图 3-10 所示。

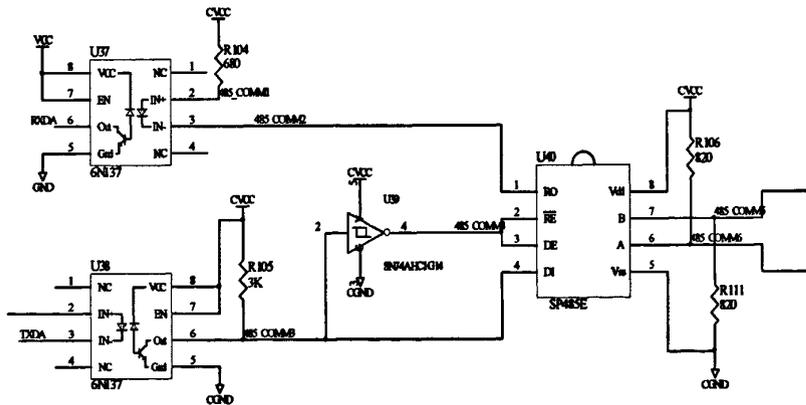


图 3-10 数字电能表采集电路

Fig.3-10 Digital power meter data acquisition circuit

通常终端的工作环境都很恶劣，这就要求在设计的时候，要考虑很多抗干扰性的要求。为了防止外部环境对 DSP 电路的干扰和破坏，以保证电路在恶劣的环境下能正常工作，实现电气意义上的完全隔离，接口转换芯片 SP485E 的两个输入、输出端应该加装防护装置，故上面的电路中加了光电隔离器件 6N137，而且 6N137 的输入端和输出端采用两组完全不同的电源来实现 DSP 电路和外界的完全隔离。同时，还进行电磁兼容相关设计，这里采用 TVS 瞬态管 SMBJ12CA，以消除浪涌、雷电等对终端的影响。

3.4 通信模块设计

终端通信功能在设计时，没有将通信电路直接与终端主电路融合在一起，而是采用模块化设计模式来实现对各种主流通信方式的支持。这种设计方式的优点是无需更换终端，只需更换或添加相应通信模块就可以适应多种通信方式，并且终端程序能自动判别所更换或添加的通信模块类型，从而调用不同驱动程序以自适应通道的变换，很大程度提高终端通信的灵活性和可扩展性。

通信模块的稳定可靠工作，是终端系统稳定工作的重要保证，因此通信模块电路设计要需全面考虑。在终端设计时，通信接口除设有防雷保护电路外，还对通信模块的供电回路进行控制，即防止在极端情况下出现通信模块故障时，终端主控电路通过关闭通信模块电源来进行彻底上电初始化，重启通信模块，从而很好提高通信的可靠性。

通信模块电路包括 GPRS 通讯电路、红外接口电路、USB 接口扩展电路、扩展用通信子电路等模块及接口。在本终端设计中，所有通信接口采用串行通信实现。ADSP-BF533 处理器提供了一个 UART 接口，采用一片通用异步收发器件 ST16C554D 扩展为 4 个串口。

3.4.1 GPRS 通信模块

终端采用的是 Sony Ericsson 公司的 GPRS 无线通信网络集成模块 GR47。GPRS 通信模块是电力负荷管理终端无线通信的重要组成部份。电力系统的通信信道复杂，且通信方式多，在众多的无线通信网络系统中，GSM/GPRS 公共无线移动通信网络几乎具有集中型数据采集系统所需要的成本低、速率高、功耗低、体积小及无需组网的所有优点，所以特别适用于终端数量多、通信量大、安全性要求不是特别高的数据采集监控系统（如电力负荷管理系统、远程抄表系统、公配变监测系统等）。

GPRS(General Packet Radio Service)是通用分组无线业务的简称，是在 GSM 基础上发展起来的一种分组交换的传输方式。Sony Ericsson 公司的集成无线通信模块 GR47 是带有 GSM/GPRS 全套语音和数据功能的先进无线通信模块，其体积超小、信号接收及发送能力强、所有功能都集中在一块

集成的芯片内。并且内嵌TCP/IP协议栈，使用户可以最大程度的缩短GPRS产品的研发周期。GR47是可以配置的,可使得外部输入、输出接口提供的外部控制应用更有效。嵌入式的控制器对于在报警、仪表采集和应用公布等群组应用领域是可以任意访问的，并且支持C/C++语言编程^[14]。GR47独特的功能：

- 能够传输大批量数据并始终保持连接(永远在线)，根据我们在不同地区的测试，掉线几率是同类通信模块最小的。
- 本身具有内嵌 TCP/IP 协议栈功能。
- 开放内部 CPU 资源，且拥有所有 M2M 通信必需的功能。

3.4.1.1 GPRS 通信模块电路

Sony Ericsson公司的GP47模块采用32位实时操作系统，内置TCP/TP协议栈，其TCP/IP协议栈通过AT命令或嵌入式应用进行访问。其允许TCP/UDP传输机制以最小前期配置和操作来被使用，内嵌控制器方便集成客户应用，减少外部控制器需求。GR47支持双频GSM宽带900MHz/1800MHz，可通过SMS短消息服务、CSD、HSCSD或GPRS来发送或接收数据信息，并可处理语音及传真。

GPRS通信模块电路如图3-11所示，采用一个扩展的串口与GR47进行通信。在设计时需要注意的是，它的工作电压为3.5V~4.0V，而数据通信平均电流为350mA，最大达2A，所以在电源设计上要保证可靠供电。同时，还要考虑系统掉电后GR47还能工作一段时间，还要保证终端与主站还能进行至少一次通信。

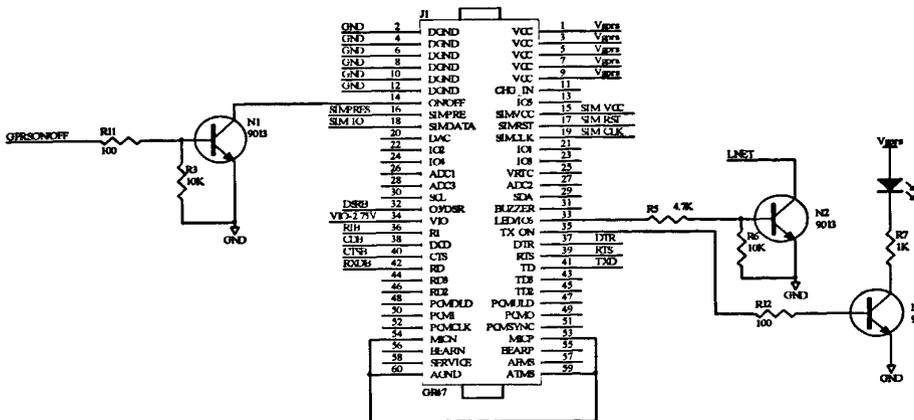


图 3-11 GPRS 通信模块电路

Fig.3-11 GPRS communication module circuit

3.4.1.2 GPRS 通信模块接口电路

GPRS通信模块接口支持模块化设计，满足在不打开机壳与防护措施的条件下实现热插拔功能。目前常用的通信模块有以下这些：GSM/GPRS、CDMA、230M无线电台等。它们与主板的接口采用统一的接口形式，可以根据用户的需要选配不同的模块。整个GPRS模块与通用异步收发器件ST16C554D连接部份如下图所示，DSRB、DTRB、RTSB、TXDB分别是串口扩展器ST16C554D的UART接口(采用扩展串口B进行扩展)。GPRS通信模块接口电路如图3-12所示。

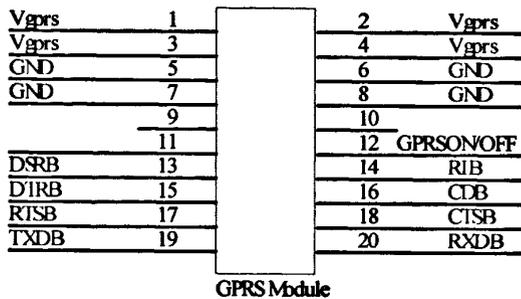


图 3-12 GPRS 通信模块接口电路

Fig.3-12 GPRS communication module interface circuit

3.4.1.3 SIM卡接口电路

在SIM卡接口电路设计中，GR47提供了SIM卡电源，可以直接相连使用。对于其它信号线，应加装防静电装置，防止过压击穿。另外，对于与主板的通信信号应进行隔离(如：采用一个总线收发器)。为了使GPRS无线通信功能收、发及复位正常，在复位GPRS时，应同时切断SIM的电源(SIM不能正常复位的错误通常是由终端相关程序引发)，SIM卡接口电路如图3-13所示。

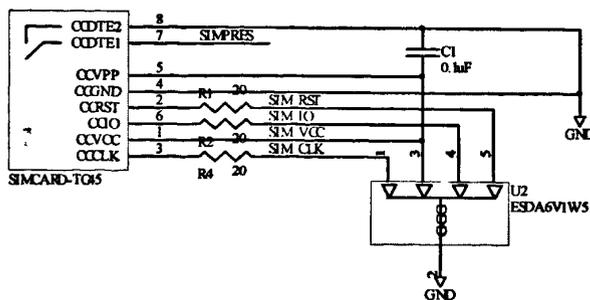


图 3-13 SIM 卡接口电路

Fig.3-13 SIM card interface circuits

3.4.2 红外通信接口电路

在终端与掌机的无线通信中，采用了红外线通信方式。微处理器的 UART 端口为其它外设或主机提供了一个简化的 UART 接口，支持全双工和 IrDA 通信功能，有 DMA 能力的异步串行数据传输，故采用该端口或其扩展端口作为红外线通信接口是很方便的。另外还利用了 ADSP-BF533 处理器的一个定时器 TIMER2 端口(配置成 PWM 输出方式)，作为数据信号的载波信号(通过一个或门进行调制)，可以设置成占空比为 50%的 38KHz 方波信号。红外发送电路和红外接收电路分别如图 3-14、3-15 所示。

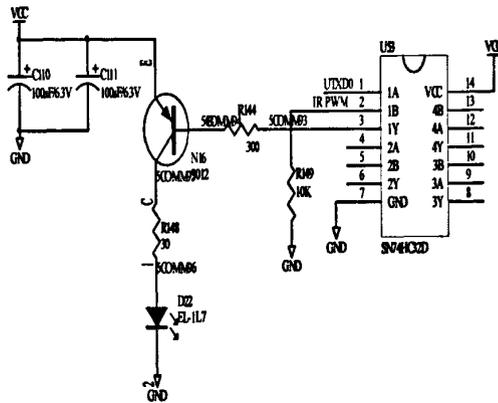


图 3-14 红外发送电路

Fig.3-14 Infrared transmitting circuit

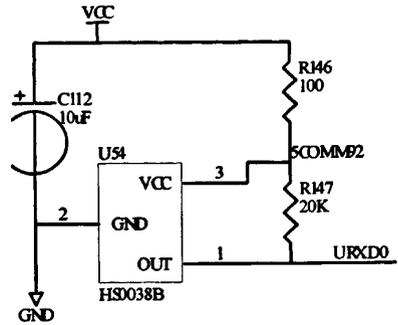


图 3-15 红外接收电路

Fig.3-15 Infrared receiver circuit

3.4.3 USB 接口扩展电路

USB(通用串行总线)是一种应用在 PC 领域的新型接口技术,支持在主机与各种即插即用外设之间进行数据传输,它由主机预定传输数据的标准协议,在总线上的各种设备分享 USB 总线带宽。

本终端采用实用新型的 USB 接口扩展电路结构简单、成本低,有利于简化电路板的整体设计,提高开发效率。与此同时,通过增加限流稳压保护电路还可以实现对 USB 接口电路的过流保护作用,有助于提高整机电路运行的稳定性和可靠性。USB 接口扩展电路如图 3-16 所示。

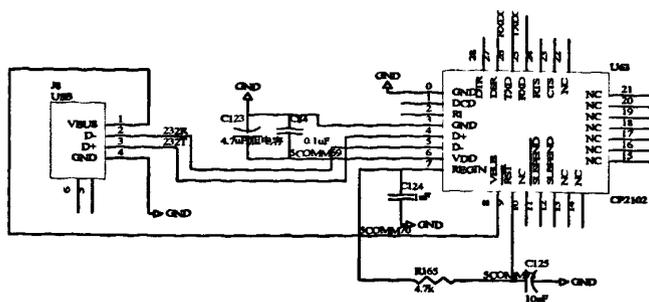


图 3-16 USB 接口扩展电路

Fig.3-16 USB Interface expansion circuit

3.5 控制电路模块设计

3.5.1 遥信电路

在遥信电路中，控制方式通常是采用常开或常闭触点，如果保护器的一个模块或多个模块失效，触点将闭合或断开，并送出故障信息。遥信电路如图 3-17 所示，其主要功能是测试外部开关、断路器等分、合闸状态并获得相应信号。这些信号都要经过光电隔离，电阻 R172、R174 是限流电阻，R155 是必要的上拉电阻。二极管 IN4148(D21)是对 PC817(U59)光电隔离器起保护作用的，防止反向电压击穿光电隔离器，SMBJ33CA(Z7)起电压保护作用的。

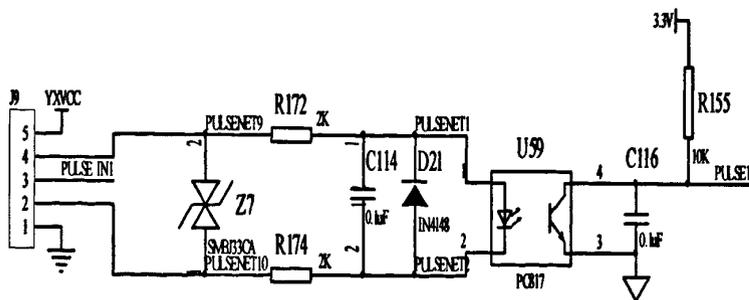


图 3-17 遥信电路

Fig.3-17 Remote communication circuit

3.5.2 遥控电路

遥控电路是电力负荷管理终端中很重要的部分，它直接面对用户，所以设计的好坏，会直接影响用户的满意程度和系统控制的可靠性。终端的

所有控制功能都是通过输出开关量来对断路器、隔离开关和继电器的动作控制。

本终端的遥控输出主要用于控制电容器组的投切和控制用户配电开关等，同时设计了 5 路开关量控制电路，图 3-18 为其中 1 路遥控电路。该设计采用了输出互补控制方案，两个控制信号分别为高和低才能使继电器动作。具体来说，就是只有当一个控制输出 I/O 口 YK1A 为低，另一个控制输出 I/O 口 YK1B 为高时，继电器才动作，而 D11 做续流二极管。采用这种双保险设计的好处是能提高输出信号的抗干扰能力，有效减少因继电器误动作而引起的事故。

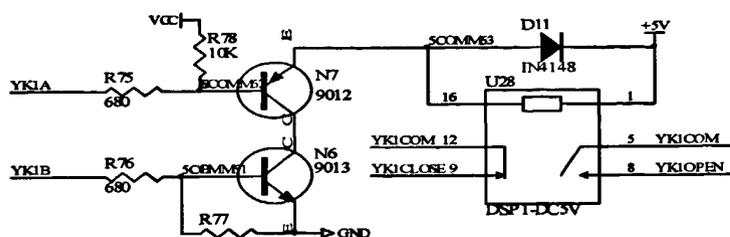


图 3-18 遥控电路

Fig.3-18 Remote control circuit

3.6 人机交互接口电路设计

人机交互接口电路的设计是为了方便用户和终端之间的数据互换，其电路设计分为两部份：键盘电路和 LCD 显示电路。

3.6.1 按键电路

终端要实现键盘输入功能，可以将键盘所使用管脚配置为通用输入输出接口(General Purpose IO ports, GPIO)。因为如果键盘响应使用中断方式，按键的中断处理程序占用较多 CPU 时间，对实时系统的影响较大，所以在本终端设计中将键盘管脚配置为 GPIO 接口。在键盘任务中采用独立的线程并调用操作系统的延时函数，实现键盘的定时扫描，扫描时间为 10ms。

终端需要功能按键并不多，没有必要设计阵列式键盘。本终端只需要 4 个按钮式按键，一个是方向上 KEY_UP，一个是方向下 KEY_DOWN，一个是确认键 KEY_OK，一个是退出键 KEY_ESC。按键电路如图 3-19 所示。

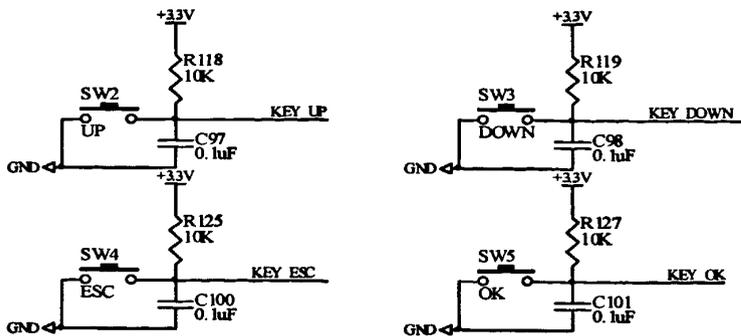


图 3-19 按键电路

Fig.3-19 Key circuit

3.6.2 LCD 显示接口电路

液晶显示模块采用的是深圳市迪威液晶显示技术有限公司生产的图形点阵型液晶显示模块DV12864C，它是128行×64列的点阵式液晶，不仅可以显示字符、数字，还可以显示各种图形、曲线及汉字，用途十分广泛。显示模块内自带液晶显示驱动控制芯片(2个)，分别控制显示屏的左区和右区。其中存储的数据直接作为显示内容的驱动信号，并由于它自身不集成中文字库，只需外加字库即可在显示屏上绘出字符。这样做带来好处是可以采用非常规的12×12点阵字符，并且可以显示自定义符号。

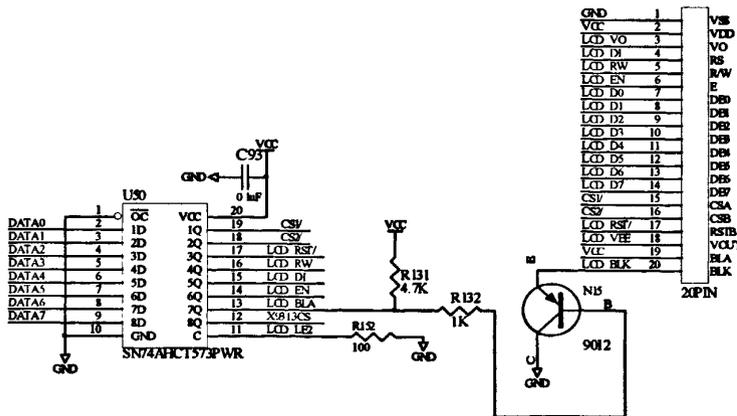


图 3-20 LCD 显示接口电路

Fig. 3-20 LCD display interface circuit

LCD 显示接口电路如图 3-20 所示，该电路用 ADSP-BF533 的通用 I/O 端口控制液晶的片选信号(CS1、CS2)和控制信号(DI、RW 和 EN)。显示的内容包括当前用电情况、控制信息、抄表数据、终端参数、维护信息(地址、电能表连接状况)等。

3.7 电源电路设计

3.7.1 电源总体设计结构

电力负荷管理终端电源是集提供稳定直流电源、交流量的取样、电流互感器二次侧的短路和开路测试于一体的功能电路模块。终端电源的设计，不仅要考虑满足电路基本功能的要求，在进行主电源设计时需要充分考虑其可靠性与电磁兼容性能。终端电源部分主要是将 220V 交流电变换成终端内各部分所需的直流电源，其中有 5V 和 $\pm 12V$ 等 3 种电压等级。其中，5V 直流电供主控板电路使用， $\pm 12V$ 供输出继电器、脉冲采样、遥信遥测电路和通信模块等使用。终端电源总体结构如图 3-21 所示。

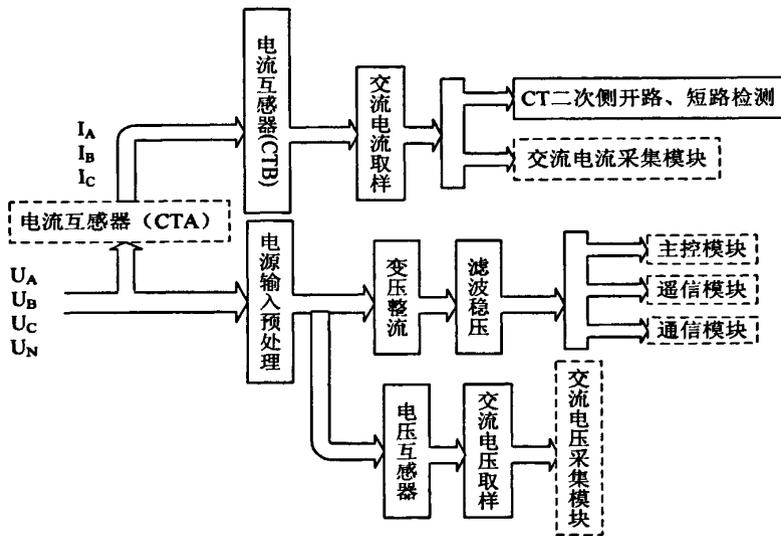


图 3-21 电源总体设计结构

Fig.3-21 Power supply design structure

3.7.2 直流稳压电源

直流稳压电源是为主控模块、遥信模块、通讯模块分别提供稳定直流电源 +5V 和 $\pm 12V$ ，从而保证各功能模块正常工作。线性直流稳压电源具有电路成熟、稳定度高、纹波小、抗干扰性能强等特点，因此，终端电源采用线性直流稳压电源设计方法。终端直流稳压电源设计框图如图 3-22 所示。

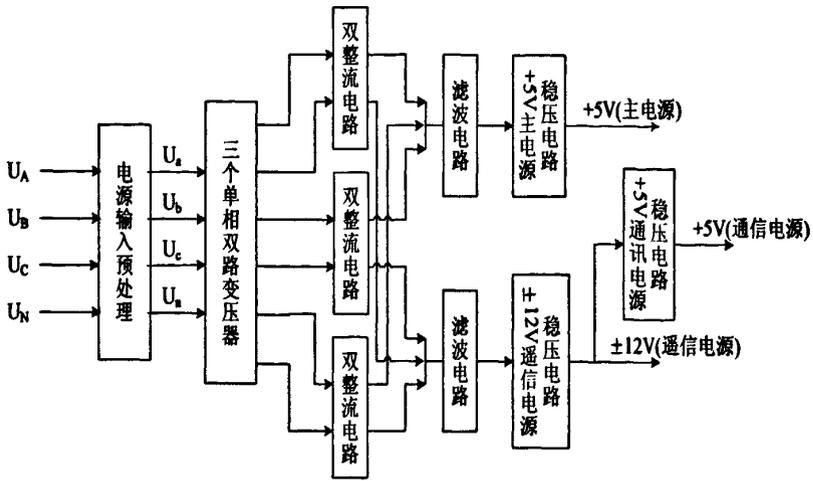


图 3-22 直流稳压电源

Fig.3-22 DC regulatory power supply

3.7.3 电源输入预处理电路

为了更大程度提高系统的稳定性和抗干扰性，在三相电源的输入端对电网电压进行预处理。电源预处理电路如图 3-23 所示。

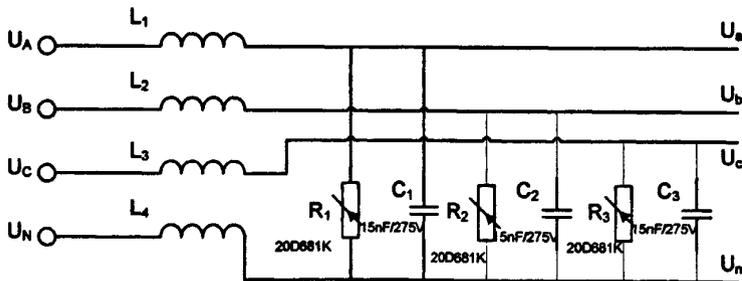


图 3-23 电源预处理电路

Fig.3-23 Power pre-processing circuit

如图 3-23 所示，浪涌信号非常容易通过电源线进入终端内部，为了防止这一干扰，可在电源输入端并联一个压敏电阻 (20D681K)，电阻值的大小可以根据压敏电阻的特性选择。为了提高系统的功率因数，并防止供电电网电压内带有高频干扰源对终端的同步振荡电路及数据采集电路等产生影响，在设计电源预处理电路时就并联电容器。电容器是起无功补偿的作用，也是通低频抗高频作用。同时在每相线上都串接共模电感，用来防止共模信号干扰。

3.7.4 变压整流和滤波稳压电路

线性直流电源使用三个单相双路变压器 220V/12V450mA-16V130mA，每相输出两路高、低电压有效值分别为 16V 和 12V。由于是三相电压的输入，所以有六路电压的输出。为了得到直流电压，必须对六路输出电压进行整流，又因为输出电压不同，所以采用不同的整流芯片对其进行整流。对电压有效值为 16V 和 12V 的电压，分别采用 RS407 和 RS207 整流芯片进行处理，得到六路脉动的直流电压。

滤波电路能够有效减小脉动直流电中的脉动成分的幅度，使最后得到的直流基本稳定，满足稳压设备供电的需要。最后将滤波后的电压，经过稳压电路调理才得到真正的直流稳压电源，可将作为直流电子设备的供电电压，并使其正常工作。因此，终端电源采用了 LM2576-5.0 和 L7812 线性集成稳压芯片来进行滤波稳压电路的设计。将 RS407 整流芯片整流后得到的电压再经稳压芯片 LM2576-5.0 稳压后输出 +5V 电压用于主电路供电。利用 F1205DC-DC 转换模块从 12V 电压中分出一个 5V 用于通信电源。由 RS207 整流芯片整流后得到的电压再经稳压芯片 LM7812 稳压后输出 12V 电压用于遥信电源。

另外，由于整流输出的三路（高）和三路（低）电压同时分别作为稳压芯片 LM7812 和 LM2576-5.0 的输入，所以三相电路中只要有其中一相电路正常工作，终端电源就能够提供稳定的直流电压使其正常工作，这就提高了终端供电的稳定性和可靠性。

3.8 硬件抗干扰设计

电力负荷管理终端是集控制、通信、数据采集及处理功能于一体的综合电力设备，是电力负荷管理系统的重要设备。通常安装在变压器及其它电力设备附近，该设备能正常工作的先决条件就是它应能承受工作环境正常运作或故事情况下产生的极强的电磁干扰。由于终端工作环境恶劣、抗干扰要求很高、运行好坏直接影响到整个电力负荷管理系统乃至需求侧管理系统运行效果。所以很有必要研究分析电力负荷管理终端电磁兼容(EMC)设计，以保证终端在工作环境正常或异常电磁干扰下能够正常运行^[29]。

电力系统设备的电磁干扰源有外部干扰和内部干扰两个方面，这些干扰源会对电力负荷管理终端产生以下几种主要电磁干扰：电快速瞬变脉冲群、浪涌、高频电磁场、高频振荡波等。电磁兼容设计主要解决的问题是针对终端受到的不同电磁干扰现象，分析其本质原理，找到抑制或者减少这种干扰对终端正常运行的影响，使终端满足我国相关电磁兼容标准要求。下面将上述每种电磁干扰进行分析，并提出相应的抑制干扰设计方法。

(1) 防浪涌

浪涌信号主要产生因素是由于系统设备或部件切换(开关跳闸、电容器组的投切)、负载突变、系统故障、雷击等会瞬间对终端产生很大的浪涌电流或瞬间高电压。浪涌信号特点是快速上升、缓慢下降、低频率及高能量。

这部分设计的失败可能直接导致终端毁坏，所以单独列出来。浪涌信号及雷击产生的高电压非常容易通过电源线进入终端内部，为了防止这一干扰，可在电源输入端并接一个压敏电阻，电阻值的大小可以根据压敏电阻的特性选择，在输出端并接电压抑制器。正常情况下，压敏电阻处于高阻状态，相当于开路。但一旦出现过电压，它便迅速转变为低阻状态，将过压能量泄放到地，并把电压限制在钳位电压上。同时可在每相线上串接共模电感，用来防止共模信号的干扰。浪涌信号也非常容易通过模拟量输入通道进入终端内部，因此，应在电压、电流变换器的输入端并接高压瓷片以限制浪涌电压，也可用磁珠、磁环来限制浪涌电流。使得电路具有双重防浪涌功能。

(2) 防电快速瞬变脉冲群

电力系统中的继电器、接触器等小电感性负载在切换时将产生脉冲群的传导干扰。电力系统中的六氟化硫开关和高压真空开关在切换时将产生脉冲群的辐射干扰。这些脉冲群的特点就是上升时间快、持续时间短、单个脉冲能量小而重复率高。

电快速瞬变脉冲群信号通过电缆芯线耦合电容加到相应的电源线上，信号电缆的屏蔽层则和耦合或去耦网络的机壳相连，机壳则接到参考接地端子上。这就说明脉冲群干扰实际上是加在电源线与参考大地之间，因此加在电源线上的干扰是共模干扰。确定了干扰的共模性质，我们就可以采取相应的措施来抑制电快速瞬变脉冲群的干扰。

(3) 屏蔽高频电磁场

高频电磁场产生的源头有很多,如无线电广播、电视台的发射机、小型无线电收发机以及各种工业电磁源均会频繁地产生这种辐射,其特点是频率高、频谱宽。目前抑制高频电磁场辐射的常用方法有屏蔽和滤波。采用金属外壳是最好的屏蔽电磁干扰方法或非金属外壳也可通过喷涂导电材料(如石墨)进行电磁干扰屏蔽。

(4) 电气隔离

由于很多干扰源都可能由模拟信号串入数字电路,而引起数字电路的误动作。在本终端中加入大量的隔离器件(如:光电隔离器件和有电压变换器)。隔离技术主要用于开关量、脉冲量采集、开关量输出、及 RS232/RS485 等通信中。由于这些电路都与外界电路有直接的电气连接,为了防止了外界干扰窜入到终端的数字系统中,就需要用光电隔离器对内外电路进行电气隔离。光电隔离器以光为媒介传输信号,因而其输入和输出在电气上是完全隔离的。

(5) 接地技术

接地方式的合理性也能起到抑制干扰的作用,本设计遵循的接地设计原则有:数字地、模拟地相互分离,以避免数字信号通过地线耦合到模拟信号中而对模拟信号产生干扰,两种地采用单点并联相接。数字输入、输出端和模拟输入端尽量远离,以避免数字信号通过布线产生的寄生电容耦合到模拟输入端。地线和电源线加粗,特别是电量较大的主电源走线和接地的主地线都特别加粗。

实验证明,上述抗干扰措施是易行且有效的,通过采取这些抗干扰措施,可以有效提高电力负荷管理终端整体电磁兼容性能。同时,随着电力系统的不断发展,电磁环境越来越恶劣,各种自动化设备的电磁兼容性受到越来越严格的挑战,测试等级也会越来越高,所以不断研究各种电磁干扰来源、传播途径以及抑制方法,提高电子设备的自身抗干扰能力和电磁兼容性能,对电力负荷管理终端运行的可靠性及安全性具有很重要的意义。

3.9 本章小结

本章简述了电力负荷管理终端的硬件总体结构及各主要电路模块的功能与实现。终端在实现各功能时采用模块化的设计方式，也注重终端的电磁兼容(EMC)性能，这使其各功能划分更明确、研发更高效、运行更稳定与安全，同时也为终端的软件设计创造良好的硬件电路环境。

第四章 终端软件设计

4.1 程序软件开发环境

Visual DSP++集成开发环境是 AD 公司的 DSP 专用开发工具，支持 ADSP SHARC/Blackfin 等系列处理器。Visual DSP++通过图形窗口的方式与用户进行信息交换，程序开发人员可以在窗口中进行高效程序编写及项目工程管理，轻松的在编辑、编译和调试之间切换，实现高效率程序开发。Visual DSP++集成开发与调试环境为编辑、编译、调试程序提供了完整的图形控制。在这个集成环境下，用户可以灵活地进行各种操作活动。Visual DSP++具有强有力的管理体系，为处理器应用程序和项目的开发提供了一套完整工具，包含生成和管理处理器及工程项目所有必需的工具。

Visual DSP++开发环境软件集成了 Visual DSP++ Kernel(简称：VDK)。VDK 是一个多任务、可裁剪的操作系统内核，并能够方便用户从软件中获得硬件实现的详细信息，使用户可以更加专心地完成处理算法的实现。如果用户配置了第三方开发工具，用户可以根据开发目标的要求选定编译器、调试器、汇编器、链接器或程序装载器^[27]。Visual DSP++开发环境主要特点为：

- 具有强大的编辑功能和灵活的工程项目管理功能
- 对各种 SHARC 工具的操作非常容易快捷
- 调试运行与多任务处理支持
- 支持汇编语言、高级语言 C/C++
- 专业化链接、支持图形化管理链接描述文件
- Visual DSP++ Kernel (即：VDK)，DSP 处理器的图形化多任务操作系统内核。

4.2 软件总体结构设计

电力负荷管理终端软件总体结构设计分为 2 个层次：最高层为操作系统内核(即：VDK)，是整个终端系统的管理核心。次层为任务层，包含电

路驱动程序、通信规约和应用程序。终端软件总体结构如图 4-1 所示。

传统的终端设计采用单任务系统，程序循环的周期不确定，因而键盘扫描周期无法确定，且很大程度上受到主程序循环时序的影响，当程序运算量较大时容易出现明显的键盘响应延迟。而且，当主程序中某个程序模块出现问题时，将出现死机现象，直到“看门狗”复位为止，从而影响终端数据采集的精度、实时性和控制功能的实现。然而，在本终端软件设计中采用多任务管理系统，可以很好地解决这些问题。利用嵌入式实时操作系统内核对所有任务进行统一的调度和管理，使 CPU 的使用权在建立的任务之间切换。在多任务机制下，可实现应用程序的模块化和开发任务层次化，具有较好的扩展性能。由于采用高性能的 32 位处理器，使得终端在数据采集、运算处理及定时中断等方面都能很好的满足要求。

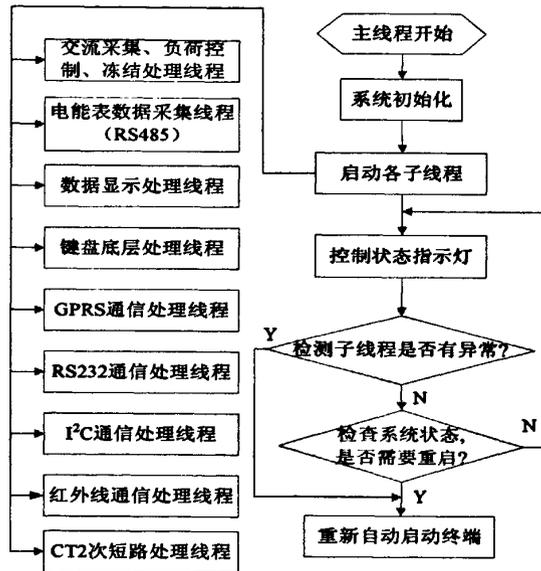


图 4-1 终端软件总体结构

Fig.4-1 The overall structure of the terminal software

4.3 程序功能模块设计

4.3.1 AD73360 交流采集模块设计

电能质量测试分析的核心是交流数据的采集分析，也就是如何可靠、准确及快速地采集电力线路中各个模拟量。交流采集模块采用了专用电力同步采集芯片 AD73360 对三相交流电的电压电流进行同步采集，并通过

ADSP-BF533 的同步串行接口 SPORT(Synchronous Serial Port)采用主 (AD73360)从 (ADSP-BF533)模式进行数据传输,同时在微处理器内部也采用 DMA 的传输方式实现 SPORT 与存储器之间的数据传输。该交流采集模块主要优点是实时性好、信号采集同步、研发周期短、便于调试及维护。

4.3.1.1 交流采集程序设计

终端的交流采集程序采用了模块化的设计方式,保证了程序开发的高效性和可扩展性,交流采集主程序如图 4-2 所示。终端上电后,首先对 DSP、SPORT 通信接口、DMA 和 AD73360 等进行初始化,并启用 SPORT 接口的 DMA 中断,然后开始进行多路信号的采集和,并将数据通过 SPORT 接口发送给主控 DSP,当 DMA 指定的存储区存放一定的数据点数后,便产生相应的中断信号,而微处理器通过相关的系统函数判断出中断响应的入口地址,进行中断响应对数据进行处理。

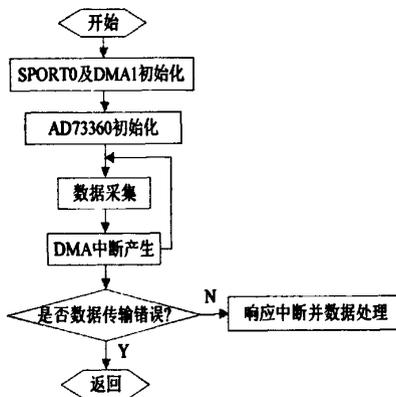


图 4-2 交流采集主程序

Fig.4-2 AC collected the main program

4.3.1.2 AD73360 的初始化

本终端采用了 AD73360 电力专用数据采集芯片,并很好将其应用于交流采集环节。AD73360 在开始启动时,便产生一个帧信号允许 DSP 向芯片 AD73360 写入控制字,完成后再切换到数据模式开始从 AD73360 读采集数据,此后系统将不再切换到程序模式。AD73360 内部共有 8 个控制寄存器,分别是 CRA、CRB、……、CRH,他们所占用的地址为 0~7,每个的长度为 16 位。AD73360 的同步串行接口能够识别长度为 16 位的来自 DSP 的控制字,其数据格式定义如下:

15	14	13	12	11	10	9	8	7~1	
C/D	R/W	DEVICE ADDRESS			REGISTER ADDRESS			REGISTER DATA	

在终端系统中仅接入一个 AD73360 的情况下，可按如图 4-3 的程序流程来将控制字写入到 AD73360 中的各个控制寄存器。

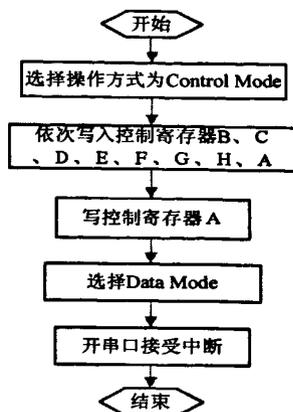


图 4-3 AD73360 初始化

Fig.4-3 AD73360 initialization

4.3.1.3 SPORT 接口及 DMA 初始化

微处理器 ADSP-BF533 集成了两个同步串行接口 SPORT0 和 SPORT1，并且这两个接口都具有 DMA 的数据传输功能。每个串行口都有自己的一套控制寄存器和数据缓冲区，而且支持可编程的串行时钟和帧同步选择。初始化 SPORT0 串行接口子程序如下：

```

void InitSport0(void)
{
    DISABLESPORT0TX();    // 关闭串口 SPORT0 的发送功能
    DISABLESPORT0RX();    // 关闭串口 SPORT0 的接收功能
    //串口 SPORT0 发送寄存器设置
    *pSPORT0_TCR1 = TFSR;    //将发送的帧信号设置为由外部输入
    *pSPORT0_TCR2 = SPORTBIT16; //发送数据位设为 16 位
    //串口 SPORT0 接收寄存器设置
    *pSPORT0_RCR1 = RFSR;    //将接收的帧信号设置为由外部输入
    *pSPORT0_RCR1 |= RDTYPE_1; // 接收数据设为符号扩展
    *pSPORT0_RCR2 = SPORTBIT16; //接收数据位设为 16 位
}
  
```

```
}

```

为了快速传输 AD73360 的电流电压采样数据,采用了 DMA 的 Channel1 通道。其初始化函数如下:

```
void InitDMA( (USHORT*)&SampleBuf, nChannel, kSPORT0RX, nBit,
              SAMPLENUMPERLINE, SAMPLELINENUM );
```

其中参数意义:

SampleBuf: 采样数据存储区

nChannel: 使用 DMA 的通道编号

kSPORT0RX: 与 DMA 通道相对应的接口编号

nBit: 传输的数据宽度

SAMPLEDMANUMPERLINE: DMA 每一行的数据点数

SAMPLELINENUM: DMA 数据存储的分行数

为了提高系统数据分析的能力,采用 2D 的 DMA 的数据存储方式,并且当每一行数据存储完成就产生一次中断信号,请求微处理器的中断响应,这就使 DSP 与 DMA 得到并行工作,提高系统的数据处理性能。

4.3.2 通信模块设计

4.3.2.1 GPRS 通信模块

GPRS 无线网络通信为了实现与互联网设备数据通信,将 TCP/IP 协议作为它的核心协议。在链路层,GPRS 网络采用了 PPP 协议来支持各个节点的动态登陆,其主要特点是节点设备启动 PPP 登陆过程,GPRS 节点服务器是节点设备启动 PPP 登陆过程,GPRS 节点服务器为该节点动态配置 IP 地址。一般来讲,设备一旦获得了动态 IP,就可以以客户端方式与互联网上的服务器设备进行数据通信了。GPRS 模块与移动中心之间以及微处理器与 GPRS 模块之间的通信都遵循 PPP 协议。GPRS 模块在拨号后首先要与 GPRS 网关(GGSN)进行通信链路的协商(协商过程遵守 LCP、PAP 和 IPCP 等协议)如图 4-4 所示,即协商点到点的各种链路参数配置,获取 IP 地址。因此系统内必须要实现 TCP/IP 协议(包括网络层 IP 协议)和 PPP 协议,PPP 帧结构定义为:

F起始/结束符 0x7E	地址码 0xFF	控制码 0x03	协议类型 2字节	数据域	检验码 2字节	F起始/结束符 0x7E
-----------------	-------------	-------------	-------------	-----	------------	-----------------

每个 PPP 帧均以 0x7E 起始和结束,地址控制码固定为 0xFF,协议类型码定义了该 PPP 协议。

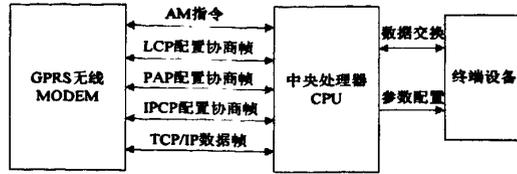


图 4-4 GPRS 通信链路的协商

Fig.4-4 GPRS communication links consultations

GPRS 模块向外提供 RS232 接口,可以在嵌入式操作系统中编写相应的 PPP 脚本拨号程序,直接驱动 GPRS 模块连接上 GPRS 骨干网和 Internet。这样数据就可以通过 TCP/IP 通道发送到任意一个具有 GPRS 网络私有 IP 地址或公网 IP 地址的主机上去,从而实现数据的无线传输。为了方便调试、维护和移植,终端 GPRS 无线通信程序流程图如图 4-5 所示,遵循模块化设计思想,采用 C/C++语言编程。

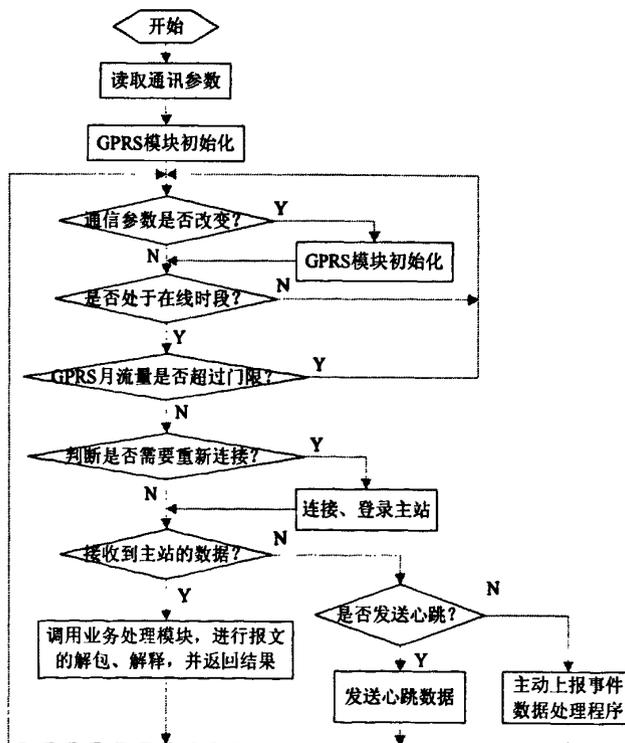


图 4-5 GPRS 无线通信程序

Fig.4-5 GPRS wireless communication program

ADSP-BF533 微处理与 GPRS 无线通信模块之间的通信协议是串口协议，DSP 只需读写 RS232 模块的指定缓冲区即可。每个指令以“AT+”开头，以回车符结尾。每个命令执行成功与否都有相应的返回，其它一些非预期的信息（如有人拨号进来、线路无信号等），模块将有相应的信息提示。为了减少代码空间，采用简化的 PPP 协议，由于 GR47 内嵌有 TCP/IP 协议，所以不用写 TCP/IP 协议。为了提高终端无线通信的可靠性和实时性，采用应答机制，即基本上是等待监控主站系统的抄表命令，收到后进行处理并转发给终端，然后又等待接收终端的数据，对接收到的数据处理后发给监控主站系统。

4.3.2.2 RS485 通信模块

在此模块设计中，主要是解决多线程对 RS485 接口争用问题。此模块运行于“数字电能表数据采集线程”中，根据不同请求、不同电表规约调用不同的接口、配置不同的电表规约。RS485 通信程序流程图如图 4-6 所示。

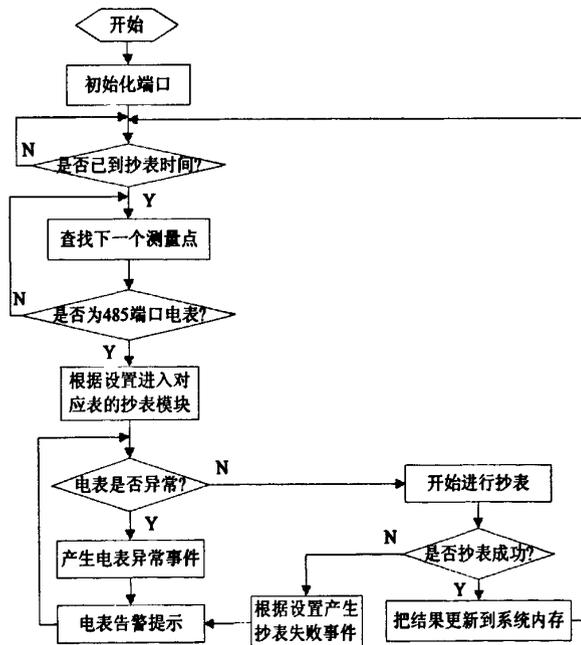


图 4-6 RS485 通信程序

Fig.4-6 RS485 communication program

4.3.2.3 红外线通信模块

在终端与掌机通信设计中，采用红外线通信技术。利用独立通信线程进行解码和编码，并将 DSP 定时器 TIMER2 配置为 PWM 输出方式，作为信号传输载波，从而实现信号接收与发送。红外线通信流程图如图 4-7 所示。

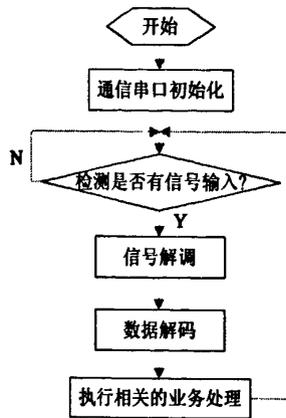


图 4-7 红外线通信程序

Fig.4-7 Infrared communication program

4.3.3 功控与电控程序设计

功控、电控主要运行于“负荷控制”线程中。此线程每隔一分钟调用功控、电控的处理函数。功控与电控程序流程图如图 4-8 所示

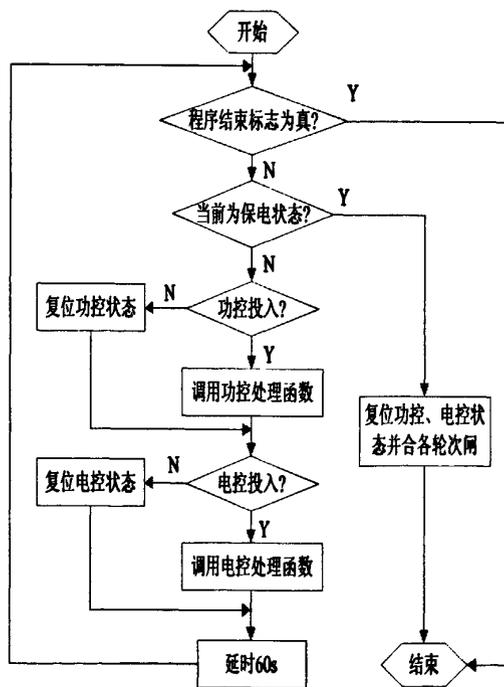


图 4-8 功控与电控程序

Fig.4-8 Power control and electric control procedures

终端在接收到功控时段、功率定值及功控投入等命令后，将执行当地闭环控制，同时发出声光信号，即相应的语音提示和面板信号灯指示。如果当前负荷超出定值并且正处于功控时段内，则将发出声光报警信号，累

计告警次数(每分钟 1 次)超出规定值时(一般为 10 次),则终端自动进行第一轮跳闸。若仍处于功率告警状态,则每隔规定时间,依次进行后续轮次跳闸。当负荷低于定值,则消除告警。当功控时段结束时,自动熄灭有关功控跳闸指示灯,并允许用户合闸。收到“功控解除”或“允许合闸”(即:保电状态)命令后,也可解除越限跳闸状态。当处于电量控制状态时,月电量或日电量超过电量定值的 80%时,终端发出声光告警信号。当实际电量超过定值时,终端就对主进开关进行跳闸。当收到“电控解除”或“允许合闸”命令后,或到了日末、月末,则自动清除有关电量越限跳闸状态。

4.3.4 采样中断程序设计

终端的开关量采集、脉冲量采集计算、跳闸事件的记录及对用户开关的控制都是在中断服务程序中完成。采样中断程序主要实现的功能是响应开关量、脉冲量采集、跳闸事件记录及开关控制中断。每 10ms 对开关状态量进行一次采集和判断,每 8ms 对脉冲量进行一次采集,每 1 分钟对脉冲量进行一次计算和输出控制判断,计算算法采用脉冲电能表电参量专用算法。采样中断程序流程图如 4-9 所示。

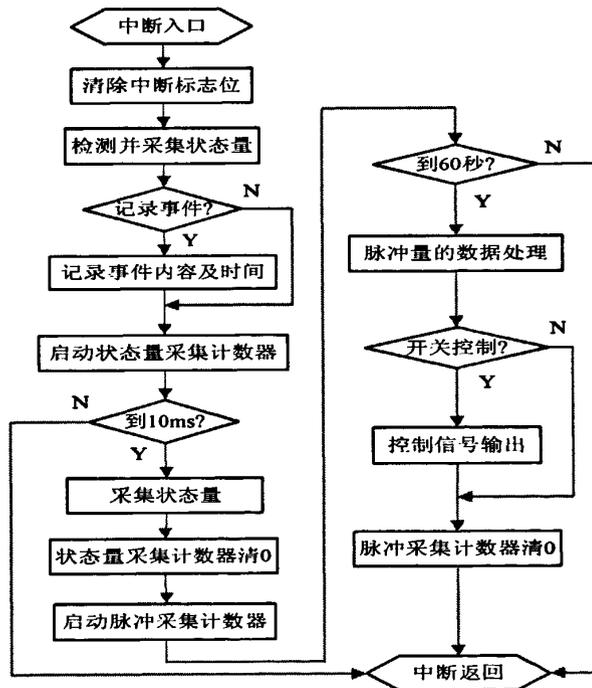


图 4-9 采样中断程序

图 4-9 Sampling interrupt program

4.3.5 人机交互程序设计

本终端采用键盘操作和液晶显示相结合，实现多层菜单操作的功能。仪器显示界面分为主菜单操作界面和子菜单操作界面，其中子菜单采用两级，分为一级子菜单和二级子菜单。主菜单操作界面显示一级子菜单名称，二级子菜单操作界面主要显示参数值。每个操作界面设置相应的 ID，系统通过“当前操作界面+有效按键”的按键操作方式来识别 ID 值，从而显示相应的操作界面。人机交互程序流程图如图 4-10 所示。

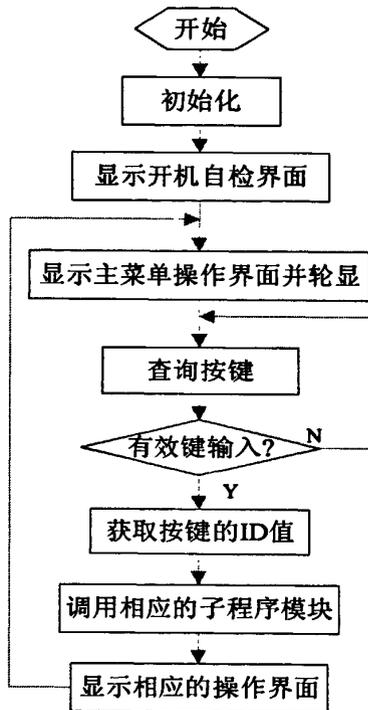


图 4-10 人机交互程序

Fig.4-10 Human-computer interactive process

程序采用模块化编程，每个操作界面对应相应的子程序模块，子程序模块包括显示屏幕的内容与格式、计算参数等。键盘操作采用查询方式，在查询中判断用户的操作，显示相应的界面。所以该程序是一个循环判断过程，根据用户按键操作来执行相应的任务。

4.4 本章小结

本章在终端硬件电路设计的基础上，对其软件总体结构及各应用功能程序模块进行设计。主要在 Visual DSP++ 的开发环境中，利用了图形化、

多功能及多任务处理的操作系统内核 (VDK) 进行多任务、多线程与模块化程序设计，提高了终端研发的效率、增强可扩展性能和可维护升级性能，并满足终端的基本功能及性能要求。

第五章 终端应用算法分析

5.1 基本电参量算法

本文提出的计算方法均采用基于同步采样原理的工频电流、电压、功率、功率因数、相位、频率等数值算法。这些算法适用于基于交流采样原理的数字化电工仪表、标准电能表、电力负荷管理终端等设备功能软件开发，同样也适用于基于谐波及相关电力参数的测量分析^[10]。

5.1.1 电流有效值

在交流电流中，周期性电流 i 的有效值就是热效应方面与它等效的直流电流值，在电工基础理论中称之为方均根值。基于模拟算法的电流有效值 I 定义如下：

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt} \quad (5.1)$$

式中： T —周期

$i(t)$ — t 时刻电流瞬时值

令每一个工频周期内同步采样次数为 N ，则基于离散数值算法的电流有效值 I_d 计算公式如下：

$$I_d = \sqrt{\frac{1}{NT_s} \sum_{k=0}^{N-1} i^2(k) T_s} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} i^2(k)} \quad (5.2)$$

式中： k —采样序列顺序号

$i(k)$ — k 时刻电流瞬时值

T_s —采样时间间隔（以下的定义相同）

为了使测量数据尽可能真实反映该时间段内实际电流有效值，需要对 m 个工频周期采样数据进行平滑滤波，平滑后的电流有效值 I_{dav} 离散数值计算公式为：

$$I_{dav} = \sqrt{\frac{1}{mN} \sum_{k=0}^{mN-1} i^2(k)} \quad (5.3)$$

5.1.2 电压有效值

在电工基础理论中对周期电压的有效值具有类似于电流 i 的定义, 其定义为:

$$U = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2(t) dt} \quad (5.4)$$

因此, 基于离散数值算法的电流有效值 U_d 计算公式如下:

$$U_d = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u^2(k)} \quad (5.5)$$

滤波平滑后的电压有效值 U_{dav} 的离散数值计算公式如下:

$$U_{dav} = \sqrt{\frac{1}{mN} \sum_{k=0}^{mN-1} u^2(k)} \quad (5.6)$$

5.1.3 有功功率

令电路两端所加电压为 $u(t) = \sqrt{2}U \sin \omega t$, 则流过电路的电流为 $i(t) = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi)$ 。所谓平均功率或有功功率, 可以定义为瞬时功率在一周期内的平均值, 以大写字母 P 表示如下:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t) dt \quad (5.7)$$

则基于离散数值算法的平均功率表达式如下:

$$P_d = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} P_k = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u(k)i(k) \quad (5.8)$$

式中: $u(k)$ —采样序列 k 时刻电压采样值

$i(k)$ — k 时刻电流采样值

P_k — k 时刻瞬时功率

故 m 个工频周期平滑后的平均功率表达式如下。

$$P_{dav} = \frac{1}{mN} \sum_{k=0}^{mN-1} P_k = \frac{1}{mN} \sum_{k=0}^{mN-1} u(k)i(k) \quad (5.9)$$

5.1.4 无功功率

在实际的工程中还引用无功功率的概念，无功功率用 Q 来表示，其可定义为：

$$Q = UI \sin \varphi \quad (5.10)$$

现在问题是如何通过电压及电流的瞬时采样值，实现无功功率的数值化测量呢？综合分析发现，一般都采用有功功率、视在功率的计算结果来求得无功功率的算法。显然，该算法的计算量大、计算时间长，很难满足实时性很强的终端中无功电能计算要求。根据三角函数的性质，可将式 (5.10) 变换为：

$$Q = UI \sin \varphi = UI \cos(90^\circ - \varphi) = UI \cos(\varphi - 90^\circ) \quad (5.11)$$

该公式的物理意义在于：相位差为 φ 的电压 $u(t) = \sqrt{2}U \sin \omega t$ 与电流 $i(t) = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi)$ 所产生的无功功率在数值上等于相位差为 $(\varphi - 90^\circ)$ 的电压 $u(t) = \sqrt{2}U \sin \omega t$ 与电流 $i'(t) = \sqrt{2}I \sin[\omega t - (\varphi - 90^\circ)]$ 所产生的有功功率。因此，可利用 $P = UI \cos \varphi$ ，可综合推导出基于数值算法的无功功率的计算公式：

$$\begin{aligned} Q_d &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} P'_k = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u(k) i'(k) \\ &= \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} q_k = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} u(k) i(k + \frac{N}{4}) \end{aligned} \quad (5.12)$$

式中： P'_k —在 k 时刻电压 $u(t)$ 与电流 $i'(t)$ 所产生的瞬时有功功率

Q_d —在 k 时刻电压 $u(t)$ 与电流 $i(t)$ 所产生的瞬时无功功率

$i(k + \frac{N}{4})$ —在 k 采样时刻滞后 90° 的电流采样值

m 个工频周期平滑后的平均无功功率表达式为：

$$\begin{aligned} Q_{dav} &= \frac{1}{mN} \sum_{k=0}^{mN-1} q_k = \frac{1}{mN} \sum_{k=0}^{mN-1} u(k) i(k + \frac{N}{4}) \\ &= \frac{1}{mN} \sum_{k=0}^{mN-1} u(k - \frac{N}{4}) i(k) \end{aligned} \quad (5.13)$$

5.1.5 相位差

在实现测量电压与电流之间的相位差或电压与电压之间的相位差时，本文所采用的方法是基于电压及电流瞬时采样数据的 $P_{dav} - Q_{dav}$ 算法。根据两个电气量电压和电流的采样数据，首先按照式 (5.9) 与式 (5.13) 式计算 P_{dav} 与 Q_{dav} ，再利用有功功率、无功功率的三角关系确定相位差。

即已知 $\operatorname{tg}\varphi = \frac{Q}{P}$ ，则以数值算法表示的电压与电流之间的相位差为：

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{Q_{dav}}{P_{dav}} \quad (5.14)$$

计算时值得注意的是：在计算反正切函数时可以调用汇编程序库中已有的实用计算程序，而已有实用计算程序计算结果只能限定在 $\pm(0^\circ \sim 90^\circ)$ 区间内。为了确定 $0^\circ \sim 360^\circ$ 之间的实际相位差，应先计算 $\left| \frac{Q_{dav}}{P_{dav}} \right|$ 所对应的 $(0^\circ \sim 90^\circ)$ 相位差 φ' ，其次根据有功功率 P_{dav} 及无功功率 Q_{dav} 的符号确定相位所属象限，最后综合计算实际相位差 φ 。

该算法可用于检验相电压及线电压对称性评价、电流对称性评价，用于电能表的错误接线判别计算中所需的任意电压与电压、电流与电流、电压与电流之间的相位差计算。

5.2 基-2 的快速傅利叶算法

5.2.1 离散傅利叶变换

傅利叶变换 (Fourier Transform, FT) 是信号处理领域一种很重要的算法。傅利叶变换原理表明：任何连续测量的时序或信号，都可以表示为不同频率正弦波信号的无限叠加。而根据该原理创立的傅利叶变换算法利用直接测量到原始信号，以累加方式来计算该信号中不同频率正弦波信号的频率、振幅和相位。傅利叶变换将原来难以处理的时域信号转换成了易于分析的频域信号 (信号频谱)，可以利用一些工具对这些频域信号进行处理、加工。最后还可以利用傅利叶反变换将这些频域信号转换成时域信号^[21]。

在实际电力系统中, 电流、电压均为周期信号 $f(t)$, 周期为 T , 并且一般满足狄里赫利条件, 因此可以展开为傅立叶级数 (Fourier Series, FS) 如下:

$$f(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} F(n\omega) e^{jn\omega t} \quad (5.15)$$

$$\text{其频谱为: } F(n\omega) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(t) e^{-jn\omega t} dt \quad (5.16)$$

式中: $\omega = 2\pi/T$ 为相应角频率 $n=1, 2, 3, \dots$

同时, 正如连续时间周期信号可以用傅利叶级数表示一样, 离散周期序列也可用离散傅利叶级数 (Discrete Fourier Series, DFS) 表示。

假设将周期信号 $f(t)$ 采样离散化后为 $x'(n) n=1, 2, 3, \dots$, 周期为 N 的序列

$$\text{即 } x'(n) = \sum_{r=-\infty}^{\infty} x'(n+rN), r \text{ 为任意整数}$$

则有 DFS:

$$x'(n) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X'(k) e^{j(\frac{2\pi}{N})nk} \quad (5.17)$$

$$X'(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x'(n) e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad (5.18)$$

式中: $n=0, 1, 2, \dots, N-1$ 为谐波次数

$k=0, 1, 2, \dots, N-1$ 为频谱时刻

$X'(k)$ - k 时刻的频谱幅值

由于数字处理器在进行信号分析中, 只能处理有限长序列, DFS 虽然是离散信号, 但还是无法利用数字处理器进行处理。由于有限长序列的离散傅利叶 (Discrete Fourier Transform, DFT) 和周期序列的傅利叶级数 (DFS) 在本质上是一致的。周期序列信号只有有限个序列值是独立的, 对于长度为 N 的有限长序列, 可以看成周期为 N 的周期序列的一个周期, 这就相当于计算有限长序列了。

$$\text{可假设 } x(n) = \begin{cases} x'(n), 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, \text{其它} \end{cases} \quad \text{其中 } x'(n) = \sum_{r=-\infty}^{\infty} x'(n+rN)$$

故有：

$$X(k) = DFT[x(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad 0 \leq k \leq N-1 \quad (5.19)$$

$$x(n) = IDFT[X(K)] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} X(k)e^{j(\frac{2\pi}{N})nk} \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (5.20)$$

式中： $X(k)$ — k 时刻的频谱幅值

$x(n)$ — n 为采样点数序号

然而，DFT算法的计算量太大，很难应用于实际工程的数据处理分析。但由于DFT算法的蝶形因子具有对称性与周期性，可以据此对算法进行优化，从而提出快速傅利叶变换(FFT)，满足了终端系统实际要求，也使该算法在数据处理相关的工程领域得到广泛的应用。

5.2.2 基-2 快速傅利叶算法原理

设输入时域信号为序列 $x(n)$ 的长度为 N ，且满足 $N=2^M$ ，其中 M 为正整数。实际的序列可能不满足此条件，可以人为的在序列的尾部加入若干零值点达到这一要求。将长为 $N=2^M$ 的序列 $x(n) n=0,1,\dots,N-1$ 按 n 的奇偶分解为两个 $N/2$ 点的子序列则有：

$$\begin{cases} x(2r) = x_1(r) \\ x(2r+1) = x_2(r) \end{cases} \quad n=0,1,\dots,N-1 \quad (5.21)$$

设其转换后的频域信号为 $X(k)$ ，则离散傅立叶变换为：

$$X(k) = DFT[x(n)] = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi}{N}nk} \quad k=0,1,\dots,N-1 \quad (5.22)$$

$$\text{令： } W_N = e^{-j\frac{2\pi}{N}}$$

则有：

$$\begin{aligned} X(k) &= \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk} = \sum_{n \text{ 为偶数}} x(n)W_N^{nk} + \sum_{n \text{ 为奇数}} x(n)W_N^{nk} \\ &= \sum_{r=0}^{N/2-1} x(2r)W_N^{2rk} + \sum_{r=0}^{N/2-1} x(2r+1)W_N^{(2r+1)k} \end{aligned}$$

$$= \sum_{r=0}^{N/2-1} x_1(r)(W_N^2)^{rk} + W_N^k \sum_{r=0}^{N/2-1} x_2(r)(W_N^2)^{rk}$$

由于 $W_N^2 = e^{-j\frac{2\pi}{N} \cdot 2} = e^{-j\frac{2\pi}{N/2}} = W_{N/2}$, 故上式可以写成

$$X(k) = \sum_{r=0}^{N/2-1} x_1(r)W_{N/2}^{rk} + W_N^k \sum_{r=0}^{N/2-1} x_2(r)W_{N/2}^{rk} \quad k=0,1,\dots,N/2-1 \quad (5.23)$$

但由(5.28)式计算得到的只是 $X(k)$ 的前一半结果, 所以应用 W_N^{rk} 具有对称和周期性求其后一半结果, 故有:

$$\text{周期性: } W_{N/2}^{r(k+\frac{N}{2})} = W_{N/2}^{rk}$$

$$\text{对称性: } W_{N/2}^{k+\frac{N}{2}} = W_N^{N/2} W_N^k = -W_N^k$$

则 $X(k)$ 的后一半的结果为:

$$X(k+\frac{N}{2}) = \sum_{r=0}^{N/2-1} x_1(r)W_{N/2}^{rk} - W_N^k \sum_{r=0}^{N/2-1} x_2(r)W_{N/2}^{rk} \quad k=0,1,\dots,N/2-1 \quad (5.24)$$

综合式(5.28)和(5.29)式可得 $X(k)$ 值为:

$$\begin{cases} X(k) = \sum_{r=0}^{N/2-1} x_1(r)W_{N/2}^{rk} + W_N^k \sum_{r=0}^{N/2-1} x_2(r)W_{N/2}^{rk} \\ X(k+\frac{N}{2}) = \sum_{r=0}^{N/2-1} x_1(r)W_{N/2}^{rk} - W_N^k \sum_{r=0}^{N/2-1} x_2(r)W_{N/2}^{rk} \end{cases} \quad k=0,1,\dots,N/2-1 \quad (5.25)$$

上式(5.30)即是基 2 时域抽样快速傅利叶变换(FFT)的结果, 它是把长度为 N 的序列一分为二, 将 N 点 DFT 表示成为两个 $N/2$ 点 DFT 的线性组合。然后再把 $N/2$ 点 DFT 一分为二, 表示为两个 $N/4$ 点的 DFT。如此重复下去, 直至分解成两点 DFF 的运算, 两点 DFT 实际上只是加减运算。这就是基 2 时域抽样 FFT 算法的基本原理^{[30][31]}。

5.3 交流采样及谐波分析算法优化

5.3.1 采样频率选择

在进行电力谐波测试分析时，合适的采样点数是谐波分析结果准确性的重要保证。电力谐波测试分析要求快速、准确的测量计算电网基波和 2~21 次谐波的各相关参数并进行实时分析处理，所以要求采样频率

$f_s \geq 2 \times 21 \times 50\text{Hz} = 2100\text{Hz}$ 。故可将 AD73360 的采样频率设置为 64KHz，即每个电流或电压周期的采样点数为 $N = 64000/50 = 1280$ 。而基 2-FFT 算法通常取采样点数为 2 的 n 次方，为了更好的获得实时性能，用于作为频谱分析的数据可以均匀的取 128 点(可根据实际需要选择)。AD73360 最快的转换频率为 64KHz，完成一次 A/D 转换的时间为 15.6ms，ADSP-BF533 在主频 400MHz 时可实现每秒 6 亿次乘加，完全满足对 AD73360 的各种控制、数据转换读取和保存等各项操作指令对时间的要求。

在用 FFT 进行实际谐波测量分析时，首先对信号进行采样，然后建立数据窗口，获取一组 FFT 分析的数据，经过 FFT 转换得到谐波分析结果。在以上过程中，为了避免引起信号混叠，必须满足采样定律即：

$$f_s = 2 f_m \quad (5.26)$$

其中： f_s 为抽样频率， f_m 为信号最高频率

在系统中采用基 2-FFT 算法，即在一个信号周期的 1280 个采样数据中，按一定的规则对数据进行抽样 128 点。设接收 n 个采样数据，则一个周期内 128 个数据的抽取方法为：第 k 、 $\frac{n}{128}+k$ 、 $\frac{2n}{128}+k$ 、 \dots 、 $\frac{127n}{128}+k$ 个采样数据 (k 取 1 到 $\frac{n}{128}$ 之间的整数，每个数据都取整数)，取 $k=1$ ，就可在 n 个采样数据之中均匀抽取 128 个数据，满足了采样频率和信号频率同步。从中可以看出，采样频率越高， n 越大，数据抽取越均匀。

5.3.2 锁相倍频同步采样

为了数据的采样更加准确,采样频率必须与信号频率同步,且必须采集有 FFT 需要的数据点数。也就是说,当数据窗为 K 倍 (K 为整数) 信号周期 T_0 , 采样频率 $1/T_s$ (T_s 为采样周期), 数据窗内采样次数 N (N 为整数), 三者满足 $KT_0 = NT_s$ 时, 采样频率才与信号频率同步。否则, 就会产生频谱泄漏, 影响谐波分析准确度。在终端的数据采集模块设计时, 采用了锁相倍频技术实现信号的同步。其工作原理图如图 5-1 所示。

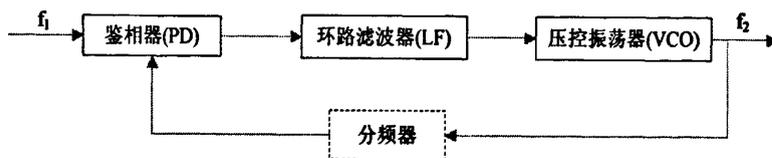


图 5-1 锁相倍频同步电路原理

Fig.5-1 PLL Frequency Synchronization Circuit

利用锁相器使信号频率和采样频率同步, 锁相器把取自采样系统的电压信号相位和频率与锁相环输出的同步反馈信号进行相位比较, 当失步时, 锁相器的相位比较器输出与二者相位差和频率差有关的电压, 经滤波后控制并改变压控振荡器的频率, 直到输入频率和反馈信号频率同步为止, 一旦锁定, 便将跟踪输入信号频率变化, 保持二者的频率同步, 输出的同步信号去控制对信号的采样。此种方法实时性较好, 可以解决频谱泄漏难题。

如果在压控振荡器和鉴相器之间加入一个分频器, 如图 5-1 所示, 则环路成为锁相倍频环路。图 6-1 中被测频率为 f_1 , 压控振荡器输出频率为 f_2 , 分频器分频后频率为 f_x 。当环路锁定时有: $f_1 = f_x$ 。

又因 $f_2 = kf_x$, 故有: $f_2 = kf_1$, k 为分频器分频比这样环路就成为一个 k 倍频锁相环路利用这一特性, 使 $k = N$, 则输出频率期不 $f_2 = Nf_1$, 其中: N 为每个周期采样点数。

当输入信号为一个周期时, 输出信号为 N 个周期, 将这 N 个周期的输出信号整形为均匀矩形脉冲, 用以作为触发信号去控制交流采样通道的多路开关、采样保持器和 A/D 等。这样就能实现自动可调频率跟踪、控制采样间隔、实现同步采样, 使采样点满足采样定理的要求、提高计算精度。

5.3.3 “异常点”消除

电力参数实时测量中, 由于某些偶然因素, 可能使波形在短时间内出现非正常的“毛刺”称之为“异常点”, 它与谐波不同, 一般出现具有随机性, 且存在时间短。当输入信号中包含一些非周期的干扰信号时, 可以通过去除极值后求均值的方法滤除或者减弱干扰信号的影响。连续采集几个周期的波形, 将每周期对应点相比较, 去掉最大、最小值, 将剩下点的平均值作为该点的采样值, 进行谐波分析。此方法可有效地减少误差, 提高精度, 但是对过多的周期求均值可能会导致正常的谐波信息被忽略掉。因此选择 8 个周期进行计算较为适宜。

5.3.4 基 2-FFT 算法优化

5.3.4.1 2N 点实数运算转换为 N 点复数运算

一般来说, 要处理的信号大多是时间的实序列, 而 FFT 算法都把实部和虚部一起算, 无形中增加了数据的存储空间和运算量。可以采用将一个 2N 点的实序列运算转换为 N 点的复数运算, 其转换过程如下:

- (1) 把一个 2N 点实序列奇偶项按逆序存放在一个 N 点复序列实和虚部中。
- (2) 对 N 点复序列进行 FFT 变换。
- (3) 把变换得到的实虚部结果再转换成 2N 点实序列的 FFT 变换结果。

5.3.4.2 旋转因子表优化

当 N 较大时, 如本终端设计时 N 取 1024, 因子表包括了余弦值表和正弦值表, 每张表都要占用 1K 空间, 共占 2K 数据地址空间。由于还需留有输入序列的运算空间及系统其他的处理单元空间, 在有限的 DSP 储存资源里 2K 的空间显得相当大。又因 $\sin x$ 和 $\cos x$ 的值具有连续性和对称性, 且第一象限内的 $\sin x$ 和 $\cos x$ 值互余。而传统的因子表把一个周期内的 $\sin x$ 和 $\cos x$ 的值全部存储, 产生大量的冗余项。本算法对此进行了改进, 只存储第一个象限的 $\cos x$ 的值, 利用三角中象限角符号的原理, 对提取的因子值进行符号修正, 从而得到正确因子值。

此改进算法实质是: 在不改变 FFT 算法的时间复杂度情况下, 利用两个蝶形运算的宏来完成只有一个象限因子表下的 FFT 变换, 从而减少了数

据的存储空间。算法在时间和空间的改进效果及减小误差上效果都很明显。

5.3.4.3 算法对比分析

研究分析直接 DFT 算法及其基 2-FFT 快速算法，采用优化的基 2-FFT 算法及高效的程序编写方式实现了电力谐波的实时分析。由于 DSP 在进行乘法运算所需的时间远大于加法运算所需的时间为了方便比较算法时间简化为乘法的算法时间。

设采集数据点为： $N=2^M$

直接的 DFT 算法时间为： N^2

基 2-FFT 算法时间为： $\frac{N}{2} \times M$

当 $N=1024$ 时： $\frac{N^2}{(N/2 \times M)} = 204.8$ ，也就表明当采集点数为 1024 时，运

算效率提高接近 200 倍。

在实际的终端系统中，三相交流电每一相采集 1024 点进行谐波分析时，其进行乘法运算的次数为 $(1024/2) \times 7 = 3584$ 。而 DSP 的运行频率设置为 400MHz，可以很好的满足运算要求。

表 5-1 算法对比分析

Table 5-1 Comparative analysis of algorithms

N	M	DFT(N ²)	FFT(N/2)*M	改善比值Q
64	6	4096	192	21.3
128	7	16384	448	36.6
512	9	262144	2304	113.8
2048	11	4194304	11264	372.4

如表 5-1 所示，随着采集点数的增加，其改善比值将越来越大，也就是数据的运算速度越快。这使得基 2-FFT 算法在谐波分析领域应用非常广泛。事实上，优化的基 2-FFT 算法 DSP 汇编程序已经编好，其程序流程图如图 5-2 所示。并在电力谐波分析中得到良好的效果，有效地保证了该终端系统的实时性，从而证明了该优化算法的优越性。

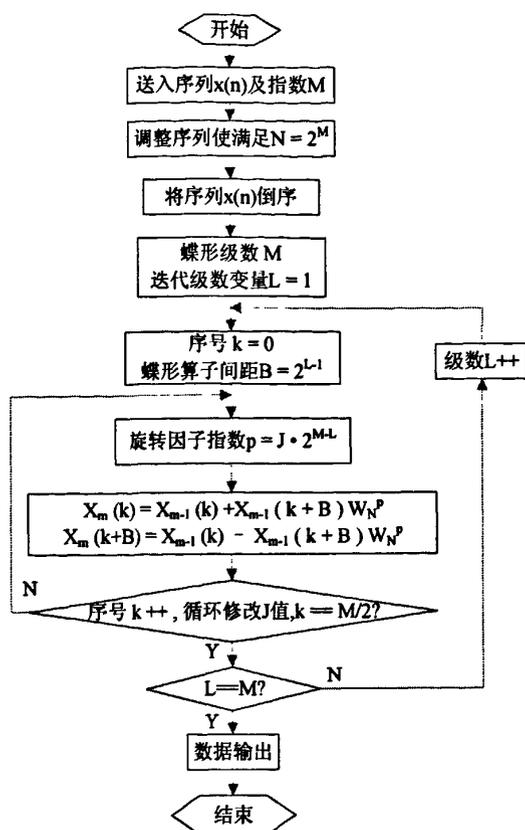


图 5-2 基 2-FFT 优化算法程序

Fig.5-2 2-FFT Optimization algorithm procedure

5.4 本章小结

本章主要描述电力负荷管理终端的基本电力参量算法、谐波分析算法及传输加密算法等数据处理算法。并在选择合适、准确及高效的算法的基础上，对数据的采集方式与数据分析处理算法进行优化，提高终端数据处理的准确性与高效性，同时也保证终端运行的可靠性与安全性。

第六章 终端自动测试分析

6.1 终端自动测试

在建设电力负荷管理系统的过程中，不仅要求终端和主站必须做到互联、互通，而且不同厂商的终端与不同厂商开发的主站系统在统一的技术规范和通信规约的平台上可以相互兼容，对不合格的产品可以用其他厂商的产品替换，从而使系统具有更好的规范性、更强的扩展性、可靠性及可维护性。因此，对新型的电力负荷管理终端设计的规范性、功能的完整性、运行的稳定性及安全性提出更高的要求，同时对终端的功能及性能的测试也更加规范、更加严格，测试的技术及方法也不断发展与创新^[2]。

6.1.1 自动测试的必要性

早期的终端测试采用手工逐台、逐项地进行测试，其测试效率低、准确性较差、测试功能不全面，只适用于少量终端的测试。而当进行大规模的电力负荷管理系统建设时，终端的数量达到数千、数万台的规模后，终端测试验收的工作量会非常大，故必须采用自动测试方式进行测试，即对所有的终端功能进行编程自动测试，一次可对多台终端同时进行测试分析，并可将测试记录进行保存或打印。终端测试采用自动测试方式，主要是考虑到以下几方面：

(1) 功能测试不可孤立进行

终端必须与主站进行联接，构成系统才可进行测试。终端、通信通道、主站软件互相联系、互相影响。如果没有统一技术规范及测试基准，则系统功能出现问题时很难判定属于哪方责任。

(2) 功能测试项目多

根据国内已经颁布的主要技术标准，终端需要测试的功能有几十项之多，对所有的功能完整测试要消耗大量时间、精力。特别是异常报警和负荷控制功能，其逻辑复杂、测试路径多，且需要模拟多种现场运行环境。因此，若采用手工方式，其工作量大、周期长、效率也较低。

(3) 测试终端数量多。

目前，全国各省的电力负荷管理系统建设或运作的规模大小不一，最大规模已经达到几万户。部分系统采用全检，而有些采用抽检。不管采用什么测试方式，终端测试数量都是很大的，必须采用自动测试才能满足实际工程进度需求。

(4) 终端生产厂商多

目前国内生产终端的厂商较多，主站系统集成商也不少。即使要求在统一的技术平台上开发，不同厂商的产品仍存在较大的差异性，对规范或标准的理解也有差异。如要做到完整的互联互通，必须在测试环节进行统一，从而最大程度的消除不同厂商之间产品功能的差异性。

鉴于以上方面，在大规模的电力负荷管理系统建设过程中，采用统一的终端自动测试技术是势在必行。终端的质量保证，从根本上来说是靠产品的设计和制造工艺来决定的，但必要的测试技术和手段也是提高产品质量的重要环节。终端测试采用自动测试技术，不仅大大提高了测试的效率和准确性，也更具规范性。同时利用统一的测试基准平台，有效保证了不同厂商终端功能的一致性和兼容性，为建立开放系统、实现不同厂商间系统和终端产品的互连、互通、互换以及营造公平竞争环境提供了基本保证。

6.1.2 自动测试环境

终端自动测试技术的工作原理是通过测试主机软件控制各接入终端及相关设备，模拟各种用电环境、用电方案、用电故障、实现现场情况的仿真环境、监测终端的各种反应，达到对被测终端功能和性能的测试。

终端自动测试环境是依据实际系统的原理构建的，具体包括测试计算机系统、终端自动测试装置、GPRS/CDMA 通信网络三部分，其结构如图 6-1 所示。

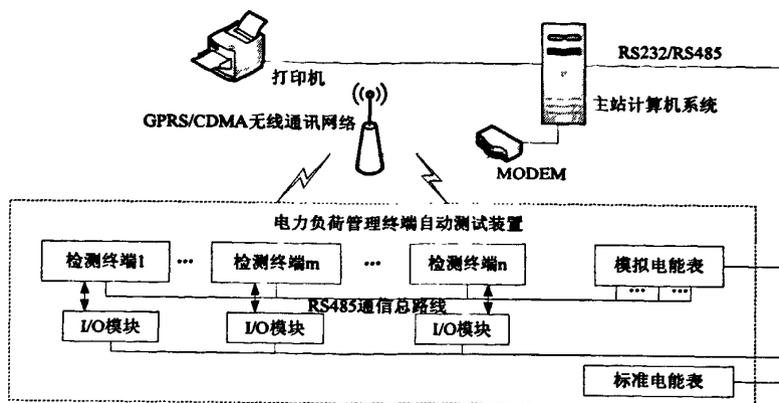


图 6-1 自动测试环境结构

Fig.6-1 Automatic detection of environmental structure

终端自动测试装置由自动测试台、I/O 模块和模拟电能表三部分组成：

终端测试台：完成电压、电流、功率、电量准确度校验以及电网运行状态模拟(如：缺相、压逆向序、无功欠补偿及过负荷等)。

I/O 模块：主要完成门节点、遥信遥控、TA 短路开路等终端输入输出接口功能的测试。

模拟电能表：是在普通电能表的功能基础上进行扩展，增加了数据输出控制层，该控制层一方面能够根据测试计算机的命令要求对参数和数据进行处理，如进行底度、脉冲常数、时区时段等电能表参数的修改，模拟停走、飞走、计量和测量数据超差等各种异常运行状态，以检验终端对电表的异常监测能力。另一方面实现多路 RS485 的输出供终端抄表。采用模拟电能表有效降低配套挂表的数量，充分增加测试台的空间利用率，减少测试输入条件的准备时间和通信接线的复杂度和工作量。

终端测试台、I/O 模块和模拟电能表三部分都通过 RS485 总线与测试主站相连，由测试主站统一调度，完成各种功能测试^[33]。

6.2 功能测试

6.2.1 数据采集测试

6.2.1.1 状态量

终端自动测试环境中设置了终端的开关量功能，在开关量的变化暂态过程中，通过召集监测终端相关数据来判断其采集处理状态量的能力。

6.2.1.2 脉冲采集

脉冲采集测试是向被测试的终端中置入电能表脉冲常数、电压和电流互感器的变比。为方便操作计算, 设置为 1 个脉冲等于 1kWh 电能量, 以每分钟 12 个和 120 个脉冲的频率分 2 次向终端输入脉冲长于 15min, 分别记录每次的输入脉冲数 N_{12} 和 N_{120} , 终端显示的电能量值 E_{12} 和 E_{120} , 功率值 P_{12} 和 P_{120} , 需量值 D_{12} 和 D_{120} , 并依据《通用技术条件》计算出误差。脉冲采集可得到的数据只有电量、功率、需量, 虽然没有采用 RS485 进行采集数据全面, 但它有功率实时的特点, 在功率监控方面有自身的价值。

6.2.1.3 电能表数据采集

为了测试方便及灵活设置电能表各类参数及事件, 在测试环境中采用模拟电能表来模拟实现电能表数据采集测试。模拟表为一主站计算机程序, 它模拟电能表走字及其它的运行状态, 并由终端通过 RS485 总线抄读模拟表数据, 用以判断数据采集的有效性和准确性。

6.2.2 数据处理测试

终端数据处理分为实时数据和历史数据。在测试时根据数据源, 判断终端是否真实准确地体现实时数据。日冻结数据、月冻结数据、负荷曲线均为历史数据, 终端能不能对数据进行冻结也是检查终端数据处理功能的一个重要方面。

6.2.2.1 功控与电控

功控分为时段控、厂休控、营业报停控、功率下浮控等。测试时数据源用脉冲采集或交采设备, 终端参数设置完毕后, 便投入相应的功控方案。通过脉冲或交采设备源产生超限值功率, 终端对功率超限情况进行分析, 并产生相关的响应或操作。

电控分为月电量控、购电量控 2 种方式。测试时数据源为与 RS485 连接的模拟电表。终端参数设置完毕的, 便投入相应的电控方式, 并让所接的电能表开始运行。终端相关的响应内容有告警、跳闸、事件生成、事件上报、关或合闸, 每一步必须准确无误。

6.2.2.2 遥控及保电

遥控测试是通过主站发出各轮跳闸、合闸命令来检查终端有没有出现

相应响应如：告警、跳闸、合闸等动作。保电也是一个重要的功能。但测试还是比较简单，在保电投入的情况下，功控、电控、遥控都无效，解除后还原有效即可。

6.2.2.3 现场电能表与终端

现场电能表测试是测试终端能否发现所接电能表参数更改(如：常数、时段等)或电能表异常(如：时间异常、飞走、停走等)，测试通过模拟表进行，模拟参数变更或电表异常，从而判断终端相应内容事件记录是否准确生成或事件上报准确完整。

现场监控终端测试是测试终端能否发现抄表故障、参数设置改变、终端停上电、购电参数设置、密码错误等事件，测试模拟对应的事件，判断相应内容事件记录正确生成或上报事件正确完整。

6.2.2.4 电网监控和通信

电网监控测试是测试终端能否发现电网电流反向、相序异常、电压越限、电流越限、视在功率越限等。测试时对终端参数设置好后，测试工作源输出对应事件、电流、电压、相角，判断相应内容事件记录正确生成或上报事件正确完整。

通信测试就是测试终端与主站能否正常通信。

6.2.3 测量功能测试

该多新型的电力负荷管理终端设计时增加了一些特殊功能(如：终端运行状态及环境的监测功能)，主要是监测终端运行环境温度、油温、油位等，也可接收非电气类信息传感器信号。

6.2.3.1 PT100 型温度传感器

在终端测试装置中没有设置铂电阻温度传感器测试功能，实际测试时自行设计了测试环境。在终端相应端子加标准铂电阻，终端测量铂电阻值模拟温度值，并通过 GPRS 通信将测量结果发回主站，并判断其测量精度。

6.2.3.2 直流线性输入量

为了方便地测量非电气类信息传感器信号，本终端设计了 4~20mA 直流测量功能。国际通用的各类传感器输出电流为直流 4~20mA。实际测试时自行设计了测试环境，在终端的相应输入端子加标准恒流源输出的 4~

20mA 直流,终端将测量得结果并通过 GPRS 发回主站,并判断其测量精度。

6.3 本章小结

终端测试技术的发展方向,必然是将传统的测试技术与计算机应用和通信技术相结合,实现终端的自动测试。通过研究开发电力负荷管理终端自动测试技术,有效地提高了大规模终端测试的效率、有效性、规范性,使不同系统与不同的终端能够相互兼容、互联互通。电力负荷管理系统的信息化、自动化对终端测试提出了更高的要求,同时也对基层单位从事终端测试的人员素质提出更高的要求。

结论

在简述了电力负荷管理系统的工作原理、基本功能及应用状况的基础上，认真研究分析了电力负荷管理终端的功能特性与性能要求。同时借鉴国内外已有的同类终端产品的成功开发经验，利用 AD 公司高性能、多任务及多功能的 16 位定点数据信号处理器 ADSP-BF533，采用了模块化的设计方式，研究实现了基于 DSP 的终端硬件功能电路模块设计和软件功能程序方案，完成了终端的硬件和软件的设计、调试及测试。

本终端能够对电网的电压、电流、功率、功率因数等运行参数进行实时测量和计算，也能够监控负荷开关状态、记录跳闸事件发生时间和电参量情况，还能对机电式和数字式电能表进行数据采集、分析和记录，实现对电能质量、开关及设备的监测与分析，并根据分析结果实施相应的控制。同时采用优化的基 2-FFT 算法对电网谐波成分进行分析，为系统主站的综合分析提供所需的各种控制或管理数据。采用自动测试的方法对终端进行测试验收，提高了工作效率、规范性及兼容性。

由于本人研究的时间和水平有限，本论文定有一些错误或不妥之处，提出的设计和实现方式本身也还有些需要完善或创新的地方。

参考文献

- [1] 刘博. 电力负荷管理系统建设若干问题的分析和探讨[J]. 电力学报, 2007, 22(1):89-93.
- [2] 张茂群, 尚玉敏, 季彦娇. 电力需求侧管理对策研究[J]. 电力与能源, 2008, (18): 325-326.
- [3] 侯丽娟, 易小年. 电力负荷管理系统的建设及应用思考[J]. 湖南电力, 2008, 26: 48-50.
- [4] 刘磊. 新型需求侧管理系统特点解析[J]. 华北电力技, 2009, (1): 36-39.
- [5] Malikas. Dynamic generating costs in DSM planning[J]. Energy, 2004, 14: 1-8.
- [6] 朱成章, 徐任武. 需求侧管理(DSM)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1999.
- [7] 张艳君, 吴志锋, 闵淑辉. 电力负荷管理系统的分析与设计[J]. 企业技术开发, 2006, 25(10): 3-5.
- [8] 童瑞明. 电力负荷管理系统应重新定义[J]. 电力需求侧管理, 2003, 5(6): 54-55.
- [9] 张利敏, 丁坚勇. 嵌入式技术及其在电力系统中的应用[J]. 继电器, 2002, 30(3): 43-47.
- [10] 周靖, 李扬, 金伟. 新型电力负荷管理终端的设计与实现[J]. 电力需求侧管理, 2005, 4(7): 37-39.
- [11] 陈红, 罗庚玉, 郑新. 对当前负荷管理系统实用化领域的思考[J]. 电力营销, 2003, (11): 4-9.
- [12] 曹宏宇, 王梓鹭. 电力负荷管理系统的建设[J]. 信息技术, 2008, (19): 79-82.
- [13] 崔宇, 朴在林, 康丽雁. 以电力负荷管理系统为平台促进 DSM 工作[J]. 电力需求侧管理, 2007,9(6):22-24.
- [14] 桂志强. 电力负荷管理系统的现状及发展[J]. 宁夏电力, 2004, (3):

- 36-37.
- [15] 侯丽娟, 易小年. 电力负荷管理系统的建设及应用思考[J]. 湖南电力, 2006, 26: 48-50.
- [16] 赖国书. GPRS 在电力负荷管理中的应用[J]. 福州电脑, 2005, (8): 53-54.
- [17] 仲华峰. 浅谈电力负荷管理功能开发[J]. 华北电力, 2000, 8:8-10.
- [18] 周靖, 李扬, 金伟. 新型电力负荷管理终端的设计与实现[J]. 电力需求侧管理, 2005, 7(4): 37-39.
- [19] 杨风海, 冯喜军, 黄深喜. 电力客户远方采集终端的关键设计技术[J]. 电力需求侧管理, 2007, 9(6): 25-27.
- [20] 赵同生, 曹冰, 曹东. 电力负荷管理系统发展方向的探讨[J]. 电力需求侧管, 2003, 5: 47-48.
- [21] 韩冰, 李芬华. GPRS 技术在数据采集与监控系统中的应用[J]. 电子技术, 2003, (8): 26-29.
- [22] 许传辉. 电力负荷管理系统的职能转变及发展趋势[J]. 电力需求侧管理, 2007, (4): 11-12.
- [23] Analog Devices Inc. ADSP-BF531 Blackfin Processor Hardware Reference, Revision 3. September 2004.
- [24] 孙国银. AD73360 在电量测量系统中的应用[J]. 中国测试技术, 2007, 33(2): 70-73.
- [25] Sony Ericsson. GR47/GR48 Design Guidelines. First Edition, May 2003.
- [26] 纪峰. 电力负荷管理终端的电磁兼容分析[J]. 电测与仪表 2007.
- [27] 罗勇江, 刘书明, 肖科. VisualDSP++集成开发环境实用指南[M]. 北京: 电力工业出版社, 2008.
- [28] 王昊, 徐和平. 常见工频电参量的数值算法研究[J]. 山西电力, 2006.
- [29] 郑君里, 应启珩, 杨为理. 信号与系统[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [30] ZANG Li-yong, WANG Xue-wei, XHOU Hai-bo. The Error Bounds Estimation of Interpolating Windowed FFT For Harmonic Analysis

- Algorithm[J]. *Acta Meterologica Sinica*, 2004, 10: 35-38.
- [31] 王艳芬, 王刚, 张晓光. 数字信号处理原理及实现[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [32] 牛世英, 梁春丽. 负荷管理终端测试装置的应用[J]. *电力时代*, 2008, (8): 102-104.
- [33] 陆静. 多功能台变监测终端测试分析[J]. *吉林电力*, 2008.
- [34] 曹小秋, 赵焕军. ADI Blackfin 系列 DSP 处理器实验指导书[M]. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [35] 丁毓山. 电子式电能表与抄表系统[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2005.
- [36] Analog Devices Inc. Blackfin Processor Instruction Set Reference[M]. Rev 2.0, May 2003.
- [37] Analog Devices Inc. ADSP-BF531 Blackfin/Processor Hardware Reference, Revision 3. September 2004.
- [38] Sony Ericsson. Application Note Using AT commands to control TCP/IP stack on GR47/GR48. First Edition, June 2003.
- [39] 韩冰, 李芬华. GPRS 技术在数据采集与监控系统中的应用[J]. *电子技术*, 2003, (8):26-29.
- [40] George J, Wakileh. 电力系统谐波[M]. 北京: 机械工业出版社, 2003.
- [41] Fan Juan, Jing Dong. Application technology of load management and control system. *Electric Power Automation Equipment*, Nov. 2002, 43-45.
- [42] M L Chan. Interrelation of Distribution Automation and Demand-side Management[C]. *IEEE Rural Electric Power Conference*, 1991.
- [43] 闫建国. 电力负荷管理终端[D]. 山东: 中国海洋大学光电工程, 2007.
- [44] Analog Devices Inc. AD73360 Data Sheet. Rev[M], 2002.
- [45] 徐占. 基于 DSP 技术的配电变压器监测终端的研制[D]. 北京: 华北电力大学, 2003.

攻读学位期间发表论文

- [1] 黄惠群, 廉迎战, 雷冲, 黄丽英. 基于 ADSP-BF533 电力谐波分析系统实现与优化. 自动化技术与应用 [TP]. 2009 年第 04 期.

独创性声明

秉承学校严谨的学风与优良的科学道德，本人声明所呈交的论文是我个人在导师的指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，不包含本人或其他用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明，并表示了谢意。

本学位论文成果是本人在广东工业大学读书期间在导师的指导下取得的，论文成果归广东工业大学所有。

申请学位论文与资料若有不实之处，本人承担一切相关责任，特此声明。

论文作者签字：



指导教师签字：



2016年6月8日

致谢

本论文是在导师廉迎战老师的悉心指导和热情关怀下完成的，在此谨向导师表示衷心的感谢和最真挚的敬意，感谢导师在这三年里对我的谆谆教导和悉心栽培。导师严谨认真的治学态度、渊博的知识、宽容大度的胸怀、开阔的视野和敏锐的洞察力给了我深深的影响和启迪。除了在知识学习上的言传身教，在生活点滴中更是培养了我严谨认真的学习态度以及谦逊真诚的处事风格。导师果敢的工作作风、忘我工作的敬业精神和高尚的师德都对我有着潜移默化的影响，这些既是我不断奋力追求的动力，也是我毕生学习的楷模。

感谢广东工业大学的各位老师在学习和实践上给我的帮助和指导。他们在这三年里给予我莫大的关心和帮助，在此向他们表示衷心的感谢并祝愿他们在今后的工作和学习过程中一帆风顺。

感谢我的家人，感谢他们对我的支持、理解、关心和帮助。非常感谢审批论文的各位老师，感谢你们为此付出宝贵时间和辛勤劳动。

黄惠群

2010年6月1日