

分类号_____

密级_____非密_____

U D C_____

昆明理工大学

专业学位硕士（非全日制）学位论文

基于低压电力线载波通讯的电力营
销计量自动化应用研究

研 究 生 姓 名 _____ 娄 燕 _____

指导教师姓名、职称 _____ 束洪春 教授 _____

_____ 李 婕 高工 _____

学 科 专 业 _____ 电气工程 _____

研 究 方 向 _____ 电力市场与营销 _____

论 文 工 作

起 止 日 期 _____ 2018.12—2023.9 _____

论 文 提 交 日 期 _____ 2023 年 9 月 25 日 _____

摘要

电力载波技术具有潜在的价值，犹如未开发的金矿，蕴藏大量的资源，应充分的开发应用。电力行业有数字化、智能化的基础和需求，利用电力线资源开发基于电力线的载波通信技术，具有节能环保、资源深度开发利用的意义。

随着居民生活的提高，对于电费结算的方式更加灵活，智能支付、远程支付方式的变化，为电力供应和费用结算带来变革。为适应新数字时代的需求，电能计量装置的数字化，抄表方式的数字化、远程通信的无线化，为电能供求结算的自动化、实时结算奠定了技术基础，但是面对数以亿级的居民用户，特别是农村和乡镇用户，最后1000m的通信接入成为供电企业急需解决的工程难题。

为了能更好的利用低压电力线进行载波通信，了解电力电力线的信道特性变得尤为重要。本文首先对通信系统的组成、信道、数字通信系统和信息传输方式进行了学习研究，电力线载波信道输入阻抗与信号传输频率正相关，各种噪声叠加后会加到电力线通道上，电力线载波通信信号的衰减与通信传输距离和信号频率有关。了解到这些传输特性后，我们采用了 M.Zimmermann 与 Klaus Dostert 的自顶向下建模法，并结合 Middleton A 类噪声模型进行随机脉冲噪声的模拟，建立了低压宽带电力载波信道模型，为后续通信仿真提供支撑。同时，就低压宽带电力线载波通信系统物理层的调制解调过程进行了分析，并依据 GB/T18657.3—2002 规定的三层模型对通信帧格式、传输规则和链路层进行了定义。最后从低压配电网复杂环境中的功耗优化和远距离宽带载波传输优化方面进行分析论述并提出优化方案，经试验得出载波芯片的静态电流可控制在 20mA，相比于未优化的宽带载波模块，功耗节省超过 30%。

从智能电网推行到综合能源互联网全面建设，伴随着电力体制改革的推进，电力技术和电力业务也日新月异，多源化+分布式的能源上网、“四表合一”、电动汽车充电桩、智能家居等新型业务不断增长，对多功能智能电表的能力提出更高要求。顺应全球能源互联网发展趋势，国际法制计量组织（OILM）也对 IR46 标准进行了修订和发布，但目前我国智能电表标准体系暂未更新，电能表均采用一体化设计，当电表出现故障时，采取整表更换的方式。同时，从安全的角度，为了防止篡改电能表程序，目前也不允许智能电表软件在线升级。这与飞速发展的职能应用需求形成了矛盾和限制。依据 IR46 标准的双芯电能表主控关键技术及核心指标，使用模块化思想，进行了三相智能电表的设计，主要通过计量和管理的组件集成，以期解决了原来电表故

障直接更换电表的问题，同时实现智能电表的在线升级。

电力线载波应用推进的同时，对载波通信系统的性能评价也提出了相应的需求，虽然云南电力研究院建设的自动化实验室，能对载波系统进行必要的评价，但由于设备庞大、设备复杂，不利于批量化的检测；系统投资较大，不利于推广，特别是针对供电局或供电公司推广应用困难就更大了。在云南电力研究院已建设的自动化实验室作为技术参照，将天龙经纬公司载波表出厂自动检测台的技术加以综合，开发一套结构合理、检测全面、价廉物美，能实现对载波电能表有效评价的测试平台，将有助于推动载波表的评价、选型和风险预期。

昆明地区计量自动化系统启动并全面投入运行以来，配电网受益于计量自动化管理系统的自动测量，季度、年度统计分析和精细化配电线路管理，解决了线路管理问题。电力营销计量自动化系统不仅能够实施监测用电现场的用电情况，还能够采集用电现场低压电网侧线路和低压台区的实际用电数据，通过对这些实际计量数据的实时监测和检查，可以快速准确的对用电现场线损数据进行监控，及时从 CT 倍率、户变关系、偷漏电情况等方面查找线损异常的原因，解决线损异常存在的问题。同时，通过计量自动化系统进行线损定量分析后采取补偿措施，不但能够解决线损异常的问题，还能有效降低配网的管理线损。另外，因为有了系统准确实时的现场用电情况数据，合理准确的计算线路供电半径、监控设备运行功耗，监测变压器容量和负载的均衡情况变得快速简单，进而为电网络建设优化升级提供了可靠的数据支撑，为降低技术线损指明了方向。

关键词 载波通信；计量自动化；集抄；电力营销

Abstract

Power carrier technology has potential value, just like an undeveloped gold mine, which contains a large amount of resources and should be fully developed and applied. The power industry has the foundation and demand for digitization and intelligence. Utilizing power line resources to develop carrier communication technology based on power lines has the significance of energy conservation, environmental protection, and deep resource development and utilization.

With the improvement of residents' lives, the methods of electricity bill settlement have become more flexible. The changes in intelligent payment and remote payment methods have brought about changes in electricity supply and cost settlement. In order to meet the needs of the new digital era, the digitization of electricity metering devices, the digitization of meter reading methods, and the wireless communication have laid the technical foundation for the automation and real-time settlement of electricity supply and demand. However, facing billions of residential users, especially rural and township users, the final 1000m of communication access has become an urgent engineering problem for power supply enterprises to solve.

In order to better utilize low-voltage power lines for carrier communication, it is particularly important to understand the channel characteristics of power lines. This article first studies the composition, channels, digital communication systems, and information transmission methods of communication systems. The input impedance of the power line carrier channel is positively correlated with the signal transmission frequency, and various noises are added to the power line channel after superposition. The attenuation of the power line carrier communication signal is related to the communication transmission distance and signal frequency. After understanding these transmission characteristics, we adopted the top-down modeling method of M. Zimmermann and Klaus Dostert, and combined it with the Middleton A-class noise model to simulate random pulse noise. We established a low-voltage broadband power carrier channel model to provide support for subsequent communication simulation. At the same time, the modulation and demodulation process of the physical layer of the low-voltage broadband power line carrier communication system

was analyzed, and the communication frame format, transmission rules, and link layer were defined based on the three-layer model specified in GB/T18657.3-2002. Finally, analysis and discussion are conducted on the optimization of power consumption and long-distance broadband carrier transmission in complex environments of low-voltage distribution networks, and optimization schemes are proposed. Through experiments, it is found that the static current of the carrier chip can be controlled at 20mA, which saves more than 30% of power compared to the unoptimized broadband carrier module.

From the implementation of smart grids to the comprehensive construction of comprehensive energy internet, with the advancement of power system reform, power technology and business are also changing rapidly. New types of businesses such as multi-source and distributed energy internet access, "four meters in one", electric vehicle charging stations, and smart homes are constantly growing, and higher requirements are put forward for the ability of multi-functional smart meters. In line with the trend of global energy internet development, the International Organization for Legal Metrology (OILM) has also revised and released the IR46 standard. However, currently, the standard system for smart electricity meters in China has not been updated, and all electricity meters adopt integrated design. When the electricity meter malfunctions, the whole meter is replaced. At the same time, from a security perspective, in order to prevent tampering with the electricity meter program, it is currently not allowed to upgrade the smart meter software online. This has formed contradictions and limitations with the rapidly developing demand for functional applications. Based on the key control technology and core indicators of the dual core electricity meter according to the IR46 standard, a modular approach was used to design a three-phase intelligent electricity meter. The integration of measurement and management components was mainly used to solve the problem of replacing the original electricity meter directly due to a malfunction, while achieving online upgrade of the intelligent electricity meter.

At the same time as the application of power line carrier is being promoted, corresponding requirements have also been put forward for the performance evaluation of carrier communication systems. Although the automation laboratory built by Yunnan Electric Power Research Institute can conduct necessary evaluations of carrier systems, the large and complex equipment is not conducive to batch detection; The large investment in the system is not conducive to promotion, especially for power supply bureaus or power

supply companies, which makes it even more difficult to promote and apply. The automation laboratory that has been built at Yunnan Electric Power Research Institute serves as a technical reference to integrate the technology of Tianlong Jingwei Company's carrier meter factory automatic detection platform, and develop a testing platform with a reasonable structure, comprehensive detection, affordable and high-quality, which can effectively evaluate carrier energy meters. This will help promote the evaluation, selection, and risk prediction of carrier energy meters.

Since the launch and full operation of the measurement automation system in Kunming, the distribution network has benefited from the automatic measurement, quarterly and annual statistical analysis, and refined distribution line management of the measurement automation management system, solving the problem of line management. The power marketing measurement automation system can not only monitor the electricity consumption situation at the electricity consumption site, but also collect the actual electricity consumption data of the low-voltage power grid side lines and low-voltage substation areas at the electricity consumption site. Through real-time monitoring and inspection of these actual measurement data, it can quickly and accurately monitor the line loss data at the electricity consumption site, and timely identify the reasons for abnormal line losses from aspects such as CT magnification, household transformer relationships, and power leakage situations, Solve the problem of abnormal line loss. At the same time, by conducting quantitative analysis of line losses through the measurement automation system and taking compensation measures, not only can the problem of abnormal line losses be solved, but also the management of line losses in the distribution network can be effectively reduced. In addition, with accurate and real-time on-site electricity usage data from the system, it is possible to calculate the power supply radius of the line, monitor the power consumption of equipment, and monitor the balance of transformer capacity and load quickly and easily. This provides reliable data support for the optimization and upgrading of electrical network construction, and points out the direction for reducing technical line losses.

Keywords Carrier communication; Measurement automation; Centralized reading; Electricity marketing

目 录

第一章 绪论.....	1
1.1 选题的目的及意义.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.2.1 电力线载波通讯现状.....	1
1.2.2 电力营销计量自动化系统现状.....	4
1.2.3 多功能智能电表现状.....	5
1.2.4 电力营销计量自动化的应用需求.....	6
1.3 论文的主要内容.....	7
第二章 低压宽带电力线载波通讯技术研究	9
2.1 引言.....	9
2.2 通信系统简介.....	9
2.2.1 通信系统的组成.....	9
2.2.2 通信系统中的信道.....	9
2.2.3 数字通信系统.....	10
2.2.4 信息传输方式.....	11
2.3 低压宽带电力线载波信道模型	11
2.4 低压宽带电力载波通信帧结构设计	13
2.4.1 帧格式定义.....	13
2.4.2 链路层定义.....	14
2.5 低压宽带电力线载波通信模块设计	17
2.5.1 通信模块化设计.....	19
2.5.2 集中器模块设计.....	19
2.5.3 应用终端模块设计.....	19
2.5.4 载波耦合设计.....	20
2.6 低压配电网低功耗远距离技术方案研究	24
2.6.1 低功耗技术方案.....	24
2.6.2 远距离技术方案.....	25
2.7 本章小结.....	26
第三章 智能电表设计与优化	27
3.1 引言.....	27
3.2 智能电能表设计与优化.....	27
3.2.1 需求分析.....	27
3.2.2 智能电表总体方案.....	30
3.2.3 硬件设计.....	31

3.2.4 软件设计	34
3.2.5 优化验证	36
3.3 本章小结	37
第四章 载波通信系统测试与性能评估	39
4.1 引言	39
4.2 载波通讯系统性能指标及测试	39
4.3 载波通讯系统评估平台组成	39
4.3.1 装置台架组成	40
4.3.2 测试主控平台	40
4.4 载波通讯系统试验与评价	41
4.4.1 电气参数测试	41
4.4.2 载波通讯重要功能模块评价	41
4.5 本章小结	46
第五章 计量自动化在区域电力营销中的应用分析	47
5.1 引言	47
5.2 线损管理及应用评估	47
5.2.1 线损“四分”管理	47
5.2.2 线损计算模型及计量装置检查关键点	49
5.2.3 电力营销系统中线损合格率异常分析处理	51
5.2.4 基于计量自动化的线损管理应用研究	52
5.3 停电管理及应用	55
5.3.1 停电事件分析及采集的原理	55
5.3.2 停电事件采集的实现方法	56
5.3.3 基于计量自动化的电力营销停电管理	58
5.4 本章小结	59
第六章 结论和展望	61
参考文献	64

第一章 绪论

1.1 选题的目的及意义

电力载波技术具有潜在的价值，犹如未开发的金矿，蕴藏大量的资源，应充分的开发应用。电力行业有数字化、智能化的基础和需求，利用电力线资源开发基于电力线的载波通信技术，具有节能环保、资源深度开发利用的意义。

随着居民生活的提高，对于电费结算的方式更加灵活，智能支付、远程支付方式的变化，为电力供应和费用结算带来变革。为适应新数字时代的需求，电能计量装置的数字化，抄表方式的数字化、远程通信的无线化，为电能供求结算的自动化、实时结算奠定了技术基础，但是面对数以亿级的居民用户，特别是农村和乡镇用户，最后 1000m 的通信接入成为供电企业急需解决的工程难题。

从早期的高压载波到近年的低压载波以及中压载波，均是基于电力系统独有的电网资源。电力行业依托从发电到输电、配电、供电的电力网，结合通信技术取得的突破，构建远程超高压载波通信网络实现发电与变电站的信息交互；利用 10kV 配电网实现配电网的远程自动优化；利用延伸到千家万户的低压电网，实现电能交易的自动抄表、结算付费或预付费，提升电力系统运行的高效、安全、节能环保。

本文作者 2013 年参与了云南电网电力营销系统（3.0）计量自动化平台的建设，主要负责用电检查、营销稽查、停电管理和客户档案管理功能的研发及实用化推广。参与了计量自动化平台架构的设计，用电检查、营销稽查、停电管理和客户档案管理业务的梳理和工作指导书编制，完成了昆明、红河、大理、玉溪等地区的系统上线和实施推广，验证了计量自动化在电力营销管理工作中的应用成效，见证了计量自动化给电力营销信息化建设，电网运营、服务和发展带来的巨大改变。

1.2 国内外研究现状

1.2.1 电力线载波通讯现状

电力线载波通讯技术的概念最早由英国曼彻斯特的 NORWEB 供电公司提出，后来并在配电网实现了 25 个终端用户的电话通信连接^[1]。电力线载波通讯技术最早是在高压配电网上实用，复用已建成的配电网，实现低成本的远距离通讯。现在，已广泛应用于远程监控、设备保护以及语音传输等领域。现在欧洲电技术标准化委员会已

将该频段确定为电力线载波通讯的正式频段。美国、德国及英国等发达国家在高压配电网应用载波通讯的技术已非常成熟，关于电力线载波通讯技术的研究已延伸至中低压配电网。

国内科研单位和电力装备生产厂商在上个世纪 80 年代，开始进行基于电力线载波通信技术的自动抄表系统和组网方式的方案论证和试验验证。这期间通信调制方式从 FSK、PSK 到发展到 OFDM 等，从窄带和扩频通信论证试验中发现了电力线载波通信在降噪方面的能力不足。近年来，随着芯片技术的迅猛发展，半导体集成电路功能规模和算力日益增强，复杂数字信号处理能力得到了显著提高，超大规模电力载波通信集成电路使得电力载波通信技术在物理层上调制/解调和降噪纠错能力明显提升，目前信道频带自适应技术已成熟，通信网络相邻节点间的信号传输已稳定可靠。

2005 年前后，国内电能表的头部供应商看到了载波通信技术在电力网应用的市场前景，开始投入研发基于网络神经元芯片的第三代电能表。随着第三代电能表的智能化发展，一方面电力线载波通信在物理层、网络层和数据链路层上的技术突破都十分显著，另一方面，国内窄带载波通信芯片进步缓慢，能够提供适用于国内电网现状的窄带载波通信芯片的厂家寥寥无几。通信网络中各个相邻节点在物理层通信能力的可靠和制定具有帧中继控制的网络传输协议是当时面临的主要技术问题。有部分供应商同电网运营商一起开始借鉴数字信号处理技术和信道编码技术，在电能表内部嵌入微处理器，设计验证具有自适应能力的窄带调制/解调网络通信方案。随着芯片技术的发展和芯片质量的提高，窄带调制/解调网络传输与信息安全控制等方面都取得突破，获得了良好效果。

按照国际惯例，我们主要从通信带宽、传输速率、调制方式三个角度来对配电网低压侧载波通讯技术进行分类研究。

下面从带宽的角度，对几种性能较好的电力线载波通讯技术进行说明。

电力线窄带载波通讯技术经过 20 多年的发展，先进已经是在模拟信号传输方面应用成熟，具有实现简单，成本节约的特点。随着信息技术的发展，传统电力线窄带载波通信不能传输数字信号的缺点也十分突出。

多载波正交调制通信技术属于扩频通信的一种。通过利用以太网载体侦听多重访问协议（CSMA/CD）中的冲突检测机制实现扩频通信^[2]。其特点是可以连接到网上的任意结点，同时抗干扰能力和自相关特性的优势也十分明显，由于该扩频通信方式只能用户近距离的单信道通信，且成本较高，现今应用也没有形成规模。

宽频电力线载波通信技术则是利用编码和调制来实现频带展宽，解决了信号占用的带宽远大于传输信息的最小宽度的问题，也就是说频带的展宽与其本身的通信数据无关；最后一个接收器使用与广播代码链接的相同解调来分解和恢复传输的数据。

20 世纪 50 年代，美国麻省理工学院 NOMAC 系统正式发布，这是扩频通信(SSC)技术应用研究的里程碑。上个世纪 70 年代，Dixon 出版了第一部扩频通信的概述性专著《Spread Spectrum System》；而到 20 世纪 80 年代初，由 Holmes 撰写的扩频通信理论性专著《Coherent Spectrum System》面世。

SSC 技术是使用伪随机编码对待传送数据进行调制，将信息频谱扩展之后再行传输，在信息接收端，则使用编码时的伪随机编码进行解调。

$$C=W\log_2(1+P/N) \quad (1-1)$$

其中：C 为通信信道的容量，W 则为通信频带宽度，而 P/N 则为信号噪声比值。从上述香农公式可以推导出当通信频带宽度(W)增加时，则可以在信道噪声比较低时以任意小差错概率达到相同信息率的通信传输，这也是 SSC 方法的核心。

数字信号处理(DSP)技术具有抗噪声、抗干扰及抗衰落等优点，但在工程方面要普遍应用，DSP 芯片的价格还是较高，难以普及。

“幅值键控”也称“振幅键控”，缩写为(ASK)，使用的是二进制数码与载频信号相乘^[4]，载波的振幅随着数字基带信号而变化的一种数字调制方式。ASK 实质就是将频率和相位设为常量，振幅设为变量，其二进制数码信息通过载波幅度进行通讯传输，载波频率仅涉及断开或连接两种状态。当调制数字信号为“1”时，传输载波导通；另一方面，当调制数字信号为“0”时，传输载波被切断。

频移键控(FSK)技术是早期一种应用于数字调试系统中的技术^{[5][6]}。通过在发送端将二进制数据信息转换成 FSK 信号，在接收端又将收到的 FSK 信号解调成二进制数据信息，使用“0”“1”电平信号使得计算机能够识别，完成数字信息的传递和交换。

由于 FSK 技术实现容易，在抗干扰和抗衰落方面的性能也不错，其在低、中速数据通讯、衰落信道或频带较宽信道上的应用较为普遍。

对于电力线上高速的传输通讯，使用“0”“1”电平信号进行调制时，很可能会发生 4 个或 8 个相移。因此，接收器需要有个精确并且稳定的参考相位来比较检测相位变化^[7]。

相移键控(PSK)技术分为绝对相移键控和相对相移键控两类。相移键控技术顾名思义是载波相位表示输入信号的调制技术。因为电路初始时，状态都是随机的，加

上相移键控又是双稳态触发电路，所以相干电路载波的初相也是随机的，这就是相移键控“相位模糊”现象。

差分相移键控（DPSK）技术则可以解决“相位模糊”的问题。ASK、FSK 和 PSK 三种数字信号通信调制技术中：FSK 与 PSK 的信号功率相差较小，不同的是 PSK 在频带利用率方面更优。从 ASK 到 PSK 再到 FSK，误码率是依次递减的。

综上所述，当带宽紧张、同时又要求较高的相对速度，且较强的抗噪能力时，选用 PSK 技术较优^[3]。

1.2.2 电力营销计量自动化系统现状

对于电网运营的各级供电局、电力公司来说，电力营销抄表、核算、收费每月都要消耗大量的人工。抄表人员走街串巷进入到各个居民小区，机关单位抄取电表底数。经统计，一名优秀的抄表人员最多约抄 500 户表。抄表人员抄回各用户计量点用电底数后，算费人员通过用户档案信息中该计量点所执行的电价计费规则计算出电费，最后由收费人员完成电费的收取。随着城市发展，手工抄表工和手工电费核算的效率已更不上电网和用电户计量点发展的速度，电能量集抄系统的设计、研发和推广迫在眉睫，而集抄系统的优势也表现明显：

- (1) 用电户的用电情况可以实时直接传回电力营销系统，无需人工抄表到户；
- (2) 供电与或县级电力公司委托银行和用电客户签订托收代收协议，电费银行直接代扣，用电客户无需再到营业厅排队缴费；
- (3) 供电局或县级电力公司通过集抄系统，可以实时获取各个计量点当前用电量值、最大平均功率，对用电情况进行监控，更为准确的了解用电负荷变化情况，科学制定供配电、保供电方案；
- (4) 实时准确地记录计算各个计量点的用电情况；
- (5) 按照抄表计划和结算规则，集抄系统准时采集回电能表底数并自动计算出电量电费，数据汇总后形成用电趋势监测表，及时发现用电异常，开展营销稽查、用电检查。

基于电力线载波通讯的电力营销计量自动化系统不仅能够实时自动采集回各个计量点低能表底数，提高抄表效率，还能按照计量的计费规则，自动计算出电费情况，电量、电费、电价情况经过确认后，电力营销报表即可直接生成，同时电力线载波技术的双工通信可以根据电力营销系统中对计量点用电的管理要求，对欠费用户可以实

现自动断电等:

- (1) 主动将计量点的用电情况实时传送回电力营销系统;
- (2) 通过委托银行代扣, 用户无需再到营业厅进行电费缴纳;
- (3) 分时段、分丰枯记录监测计量点电负荷情况, 为电力营销决策分析提供可靠的数据基础;
- (4) 按照设定的计量、计费规则, 主动实时对用电亲怪进行监控, 通过报警阈值的设置, 可以及时发现电量损失和盗窃用电。

1.2.3 多功能智能电表现状

截至 2020 年 8 月, 国家电网公司累计安装智能电能表 4.45 亿只, 采集接入户数 4.44 亿户, 采集覆盖率达 99.5%。该公司利用采集系统进行远程费用控制功能应用。

窃电行为是电网运营一直存在痛点难题的问题, 不仅会造成用电客户、电网企业的经济损失, 还会造成电力资源的浪费。电力营销用电稽查和用电检查业务制定了管理办法, 依托技术手段对窃电行为进行管理治理。当早期智能电能表出现时, 在线监测窃电是电能表计量功能以外的重要功能。在项目应用中发现, 通过监测技术和用电检查管理, 窃电行为有一定减少, 但和电网治理预期还存在一定差距。

窄带模块是早期智能电表通信所采用模块, 这种模块是利用电能量产生窄带载波, 通过数据采集设备、数据处理终端的网络线, 将数据采集结果以窄带波形势传输给数据处理终端。窄带载波的信息载入容量较小, 难以满足实时通信的需求。所以又将电能表信息采集到的信息先进行分组, 再进行传输, 因此信息数据传输效率下降, 电力运维质量也下降。

在实际应用中, 智能电表采集数据的传输稳定性非常重要, 传输稳定性不足, 不止影响传输速率, 还会导致数据丢包等问题。第一代智能电表数据运用电力线载波通信技术进行数据传输时, 传输稳定性就比较差, 经常性出现断传、丢包等问题。经分析造成这种情况的原因一是当时窄带通信模块的载波容量小, 同一条数据只能分段传输, 在数据接收端分段到达, 不止传输速率慢, 有时前一条数据的信息包还未完全到达, 下一条数据的信息包又有到达的, 数据处理决策不清晰, 经常导致中断、丢包的问题; 二是窄带模块很容易受到外界因素干扰, 导致智能电能表运行故障, 数据采集中断, 进而引起数据丢包。

进过 20 年的发展, 电网供电网络已全面覆盖到家家户户, 但因上述窄带模块的

缺点、加上利用电力线进行数据传输时距离到一定限制，导致智能电能表的日常维护工作成本大大增加，解决已经发现的问题势在必行。

目前国家电网公司管辖范围内的智能电表数据进入数据系统集成模式，智能电表数据首先由终端设备通过电力窄带通信方式采集，智能终端之间通过电力窄带数据交互模式下载数据的信息通信通道中的一层终端设备取出的电能，这种传输方式效率高，传输距离短易发包，窄带信道间隔受干扰，通信成功率低，故目前终端设备主要采集低压客户的智能电表的有功总电能、无功总电能等数据，无法深入开展智能电表全量数据采集工作，无法准确计量客户用电情况，故无法有效提升停电范围精准管理与主动服务水平。

从智能电网推行到综合能源互联网全面建设，伴随着电力体制改革的推进，电力技术和电力业务也日新月异，多源化+分布式的能源上网、“四表合一”、电动汽车充电桩、智能家居等新型业务不断增长，对多功能智能电表的能力提出更高要求^[8-9]。顺应全球能源互联网发展趋势，国际法制计量组织（OIML）也对 IR46 标准进行了修订和发布^[10]，但目前我国智能电表标准体系暂未更新，电能表均采用一体化设计，当电表出现故障时，采取整表更换的方式。同时，从安全的角度，为了防止篡改电能表程序，目前也不允许智能电表软件在线升级。这与飞速发展的职能应用需求形成了矛盾和限制^[11]。

1.2.4 电力营销计量自动化的应用需求

当前国民经济的持续高速增长，如何适应新的经济发展形势，设计研发出业务效率高，信息数据安全可靠，符合地方用电需求是电网承担社会责任的基本要求。因此，作为供电企业如何在保障经济发展的同时提供高质量的客户服务，而且还要保持企业自身的盈利水平是电力企业面临的一个重要任务。

为适应电力市场化发展营销，深化“万家灯火、南网情深”的服务理念，快速准确的监控用户侧的用电趋势，对电能调度进行科学决策，增供促销，节能减排，亟待构建一套电力营销计量自动化系统^[11]。

电力营销计量自动化系统对下连接了配电网数上数以万计的计量终端，对上连接到电力营销系统，是电力物联网的信息汇聚点。随着小区“一户一表”的普及，电力营销计量自动化系统的首要任务就是解决低压台区用电量的集抄问题，先抓住牛鼻子，对配电网的电量情况实现自动采集、集中管理。

电力营销计量自动化系统的低压载波抄表功能能够在线实时采集售电侧客户用电的情况,通过数据量大、算力强的电力营销系统,进行客户用电画像,瞄准客户需求,为电力市场营销发展辅助决策提供数据基础。通过使用内部创建的信息和外部可以得到的信息的综合应用分析,使得争取客户的成本可以通过有效的目标营销手段大大的降低。

综合电力企业面对的各种内外压力和企业管理、服务的要求,建立一套基于电力线载波通讯的电力营销计量自动化系统已迫在眉睫。

1.3 论文的主要内容

本文通过低压宽带电力线载波通讯技术研究对低压宽带电力线载波信道模型进行了分析,设计了物理层框架,通信帧结构,通信模块并提出了低功耗远距离优化方案。然后对标目前电能表应用中发现的痛点,以 **IR46** 为标准为依据,采用模块化设计思路对智能电表进行了优化设计和试验验证。为了推动载波计量装置的评价水平,降低选型风险,研制了载波智能电表测试平台。最后对电力营销计量自动化系统在区域电力营销中的应用进行了研究。

本文共分为六章。

第一章阐述了论文选题的目的和意义,介绍电力线载波通讯国际现状,电力营销计量自动化集抄系统现场,多功能电能表现状和某地区电力营销计量自动化的应用需求。

第二章从低压宽带电力线载波信道模型建立开始,进行了低压宽带电力线载波通信系统物理层架构设计、通信帧结构设计、通信模块设计。针对低碳环保节能减排的能源使用要求提出了适用于低压配电网载波通讯的低功耗技术方案。针对低压台区规模大,实际用电距离远,噪声情况复杂,提出了适用于低压配电网载波通讯的远距离技术方案。

第三章依据 **IR46** 标准的双芯电能表主控关键技术及核心指标,使用模块化思想,进行了三相电表的智能化升级设计,主要通过计量和管理的组件集成,解决了原来电表故障直接更换电表的问题,还实现了电表的在线升级。

第四章针对载波通信系统的性能评价的需求,以云南电力研究院已建设的自动化实验室作为技术参照,将天龙经纬公司载波表出厂自动检测台的技术加以综合开发自动检测台,通过对电源通道的电气参数测量,不仅能够取得被测设备在不同电压下的

电气参数，还可以通过编程衰减接收功率与载波频率分离的灵敏度测试，是一套实现对载波电能表有效评价的测试平台，将有助于推动载波表的评价、选型和风险预期。

第五章本章从昆明供电局电力营销计量自动化系统在用电检查和停电管理业务方面的应用案例出发，对计量自动化系统在反偷查漏和电力营销综合管理能力提升方面的作用进行了研究和分析。

第六章是对全文的总结和基于电力线载波通讯技术的电力营销计量自动化应用的发展展望。

第二章 低压宽带电力线载波通讯技术应用研究

2.1 引言

较大型的用电户，其消费能力强，对于装置的远程通信费用不敏感，可采用的通信信道选择方案多，如 4G、5G 无线通信等，但对于普通家庭用电户，每个电表配置一套 4G 通信模块并不现实，该通信设备的投入和通信费用的支付，无论由用电户承当还是供电方承当，都是难以承受的。在迫切的数据采集和承重的通信信道建设形成了矛盾，因此，如何在降低通信费用的同时，能及时的采集传输用户的用电信息是供电部门和工程师们需要解决的问题，考虑到电力线路覆盖到每个用电户，能利用电力线传输电能信息，这是解决问题的一个优先选择。

本章从低压宽带电力线载波信道模型建立开始，进行了低压宽带电力线载波通信系统物理层架构设计、通信帧结构设计、通信模块设计。针对低碳环保节能减排的能源使用要求提出了适用于低压配电网载波通讯的低功耗技术方案。针对低压台区规模大，实际用电距离远，提出了适用于低压配电网载波通讯的远距离技术方案。

2.2 通信系统简介

2.2.1 通信系统的组成

信号是信息的载体。信号由消息转换而来，是与消息相对应的一些物理量，通常作为时间的函数^[12]。一个完整的通信系统组成见图 2.1。



图 2.1 通信系统组成框图

2.2.2 通信系统中的信道

频率从几十千赫到几万兆赫的电磁波都属于无线电波，在这样宽广的范围内的无线电波虽然具有许多共同的特点，但是频率不同时，高频震荡的产生、放大和接受方法等就不太一样，特别是无线电波的传播特点更不相同^[14]。无线电波段既可以按频率

划分，也可以按波长划分。表 2.1 列出了划分的波段名称。

表 2.1 无线电波段名称

波段名称	波长范围	频率范围	频段名称
超长波	10-100km	30-3kHz	甚低频 VLF
长波	1000-10000m	300-30kHz	低频 LF
中波	200-1000m	1500-300kHz	中频 MF
中短波	50-200m	6000-1500kHz	中高频 IF
短波	10-50m	30-6MHz	高频 HF
米波	1-10m	300-30MHz	甚高频 VHF
分米波	10-100cm	3000-300MHz	特高频 UHF
厘米波（微波）	1-10cm	30-3GHz	超高频 SHF
毫米波	1-10mm	300-30GHz	极高频 EHF
亚毫米波	1mm 以下	300GHz 以上	超极高频

电磁波在空中传播有直射、绕射、反射、折射等现象。而能够沿导线传播的波段限于短波以下至超长波，高于短波的电磁波在普通导线上衰减极大，传播距离很短。从大量的实践结果和分析，能适合在开放的电力上有效传播的频段主要是波长在 1km-10km 的范围，即波长比传输距离更长的长波和中波，用频段来说是在 30-1500kHz 区间。

如以太网的双绞线，其传输的信号频率很高，信号也是沿铜线传输，由于是双绞线具有传输线的纯阻性的特性，线路是闭合的，具有 120 欧的特性阻抗，可以不失真地传输基带信号。

2.2.3 数字通信系统

数字通信系统用于传输数字信号，其原理框图如图 2.2。

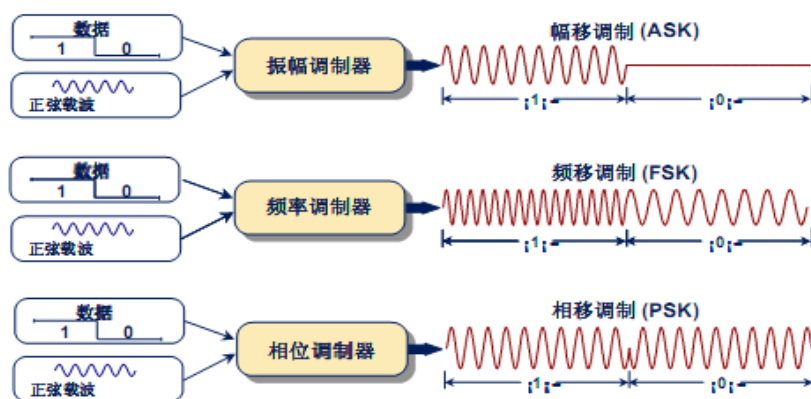


图 2.2 数字调制示意图

幅移调制（ASK），当数据为 1 时载波有振幅；当数据为 0 时，载波无振幅。数

字基带信号控制了载波振幅的有无。

频移调制 (FSK)，当数据为 1 时载波频率为 f_1 ；当数据为 0 时，载波频率为 f_2 。数字基带信号控制了载波频率。

相移调制 (PSK)，当数据为 1 时，载波起始相位 0° ；当数据为 0 时，载波起始相位为 180° ^[13]，BPSK 是两相相移调制，也可以有 4 相 8 相等多相相移调制，如数字 00 时载波起始相位 -135° ；如数字 01 时载波起始相位 -45° ；如数字 10 时载波起始相位 135° ；如数字 11 时载波起始相位 45° ，这样就实现了 4 相相移调制 QPSK，通信的码速加倍^[14]。数字基带信号控制了载波的相位。

2.2.4 信息传输方式

，通信系统可以按信息传送方向与时间关系划分为单工、半双工和全双工方式三种方式^[15-16]。

电力载波通信，由于作为通信信道的电力上的资源的唯一性，也考虑载波设备的成本，电力载波基本上采用半双工通信方式，用时间换资源的策略工作。以电力线载波集中抄表系统为例，集中器每次询问一只表的数据，被问及的电表回复数据，没有被问及的电表处于静默状态，直到全部电表的数据被抄读完成为止。对于电能表抄表数据，数据量小，实时要求也比较低，特别适合使用半双工通信方式^[20]。

2.3 低压宽带电力线载波信道模型

由于低压电力线不是专门的通信线路，它还承担着电能量输送供应的任务，为了能更好的利用低压电力线进行载波通信，了解电力电力线的信道特性变得尤为重要。通过文献的查阅及学习知道，电力线载波信道输入阻抗与信号传输频率正相关，各种噪声叠加后会加到电力线通道上，电力线载波通信信号的衰减与通信传输距离和信号频率有关。

了解到这些传输特性后，我们采用了 M.Zimmermann 与 Klaus Dostert 的自顶向下建模法，并结合 Middleton A 类噪声模型进行随机脉冲噪声的模拟，建立了低压宽带电力载波信道模型为后续通信仿真提供支撑，如图 2.3 所示。

降低低压宽带电力线载波通信的误码率关键在于，当接收端收到信号时，是否能够回溯定位到信号发出的位置。只要接收端能够准确定位到信号发出的位置，利用信号在信道中传输衰减特性的函数关系，便可反推出信号在传输过程中受到的衰落、噪

声干扰影响。再通过相关的同步技术解码，从而降低低压宽带电力线载波通信的误码率。

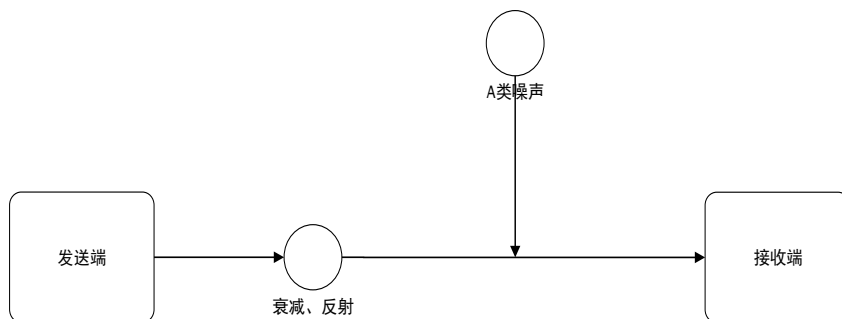


图 2.3 低压宽带电力载波信道模型

OFDM 是一种既可以被看作为一种通道复用的技术，也可以被看作为一种信号调制技术的多信号载波传输技术。选用 OFDM 技术是因为它在宽带电力线载波通信中它能很好地对抗频率选择性衰落和窄带的干扰。单信号载波通信中，一次衰落或者干扰就意味着通信的失败。多信号载波把数据流分解为若干个子数据流，以字节为单位，并行传输，然后利用多载波调制技术，例如正交频分复用技术使得各个子数据流的频谱可以相互重叠、减少干扰。

针对电力营销计量自动化系统的远程抄表业务，对通信的速率与接收端的误码率提出了更严格的要求。下面在适应国家电网的宽带电力载波通信规范的基础上，研究了低压宽带电力线载波信道的符号同步技术、采样事中同步技术和信道估计等，然后又增加了降峰均功率比技术来提升低压宽带电力线载波通信的速率、减少误码率。

下面将就低压宽带电力线载波通信系统物理层的调制解调过程进行分析。由于在工程应用中，发送端遵循的是统一的特定的编码标准，而接收端译码方式则是由各个厂家根据产品特点和应用环境进行设置，常见的有 Turbo、LDPC 与 Polar 等方式^[19]，本文就不再对这部分内容进行编码、译码研究。低压宽带电力线载波通信系统的基本框架如图 2.4 所示。

在数据信号发出前，发送端通过 QPSK 星座点映射将输入数据进行串并转换从而到一串频域信息；然后对这一串频域信息进行分割，即将这一串频域信息分割为若干个子数据流；把这些子数据流（信号）进行哈达玛编码后再进行傅里叶变换，通过通过分割时域序列并选择部分子序列来减小并找到最小 PAPR 的符号之后再加入循环前缀，通过加窗使得子数据流（信号）在宽带之外的功率谱密度快速下降，达到滤除干扰的目的。最后当并串转换和添加前导操作完成后，就将通信帧信号取实部，通过模

拟前端将信号耦合至低压宽带电力线载波信道。

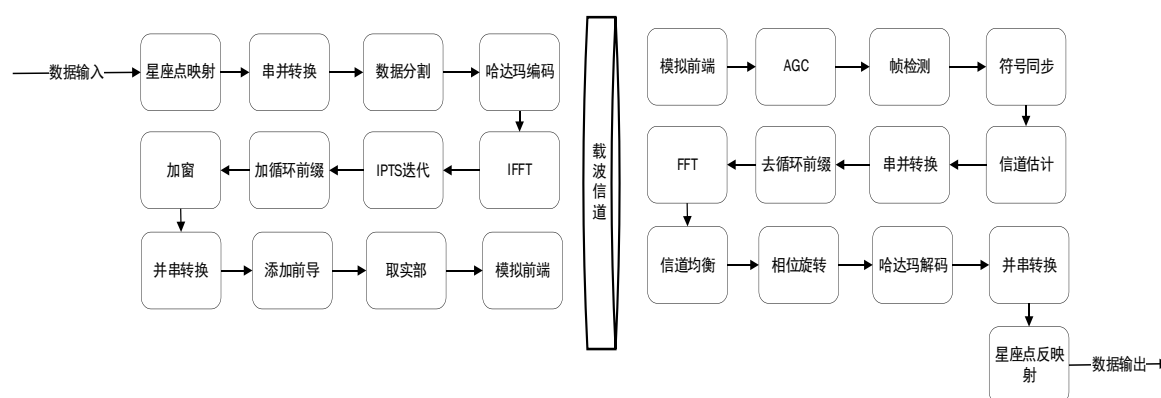


图 2.4 基于 OFDM 的宽带电力载波通信系统框架

在低压宽带电力线载波信道上传输的信号时数字信号，数字信号在 AGC 模块内进行测量和自动调节,将输出信号稳定在一个设定的范围。当帧检测模块对信号到达进行确认后，符号同步模块查找到该信号的起始位置，然后利用信道估计的关键技术得到信号信息。之后串并转换与去除循环前缀，通过快速傅里叶变换得到信号频域信息，通过补偿采样时钟偏移完成信道均衡，最后进行相位旋转与哈达玛解码、并串转换，输出数据经过 QPSK 反映射得到。

2.4 低压宽带电力载波通信帧结构设计

低压宽带电力载波通信帧结构设计依据基于 GB/T18657.3—2002 规定的参考模型，将帧的基本单元定为 8Byte，低字节在前，高字节在后，低位在前，高位在后，。

2.4.1 帧格式定义

依据 GB/T18657.1—2002 对异步式传输帧格式进行定义，详见表 2.2^[20]。

表 2.2 异步式传输帧格式

起始字符（68H）	↑	
长度 L	固定长度的报文头	
起始字符（68H）	↓	
控制域 C	控制域	用户数据区
控制域 A	地址域	
链路用户数据	链路用户数据（应用层）	
校验和 CS	帧校验和	
结束字符（16H）		

2.4.2 链路层定义

（一）长度 L

长度 L 包括协议标识和用户数据长度，由 2 字节组成，如表 2.3:

表 2.3 长度 L 定义

D7	D6	D5	D4	D3	D2	D1	D0
D15	D14	D13	D12	D11	D10	D9	D8

其中 D0~D1 为协议标识，定义如下:

1. 当 D0=0 且 D1=0 时，本协议状态为禁用;
2. 当 D0=1 且 D1=0 时，电力负荷管理系统数据传输规约状态为使用;
3. 当 D0=0 且 D1=1 时，本协议状态为使用;
4. 当 D0=1 且 D1=1 时，被协议状态为保留。

D2~D15 采用 BIN 编码，控制域、地址域、链路用户数据（应用层）的字节总数组成了用户数据长度 L。

1. 当采用专用无线数传信道时，用户数据长度 L 小于等于 255;
2. 当采用网络传输时，用户数据长度 L 小于等于 16383。

（二）控制域 C

报文的传输方向和通信所提供的传输服务的类型在控制域 C 进行定义标识了，详见表 2.4。

表 2.4 控制域 C 定义

	D7	D6	D5	D4	D3-D0
下行方向	传输方向 DIR	启动标志位 PRM	帧计数位 FCB	帧计数有效位 FCV	功能码
上行方向			要求访问位 ACD	保留	

当下行报文由主站发出，则将 DIR 置为 0；当上行报文由终端发出，则将 DIR 置为 1。

当报文从启动站发出，则将 PRM 置为 1；当报文从自从动站发出，则将 PRM 置为 0。

防止信息传输过程中的丢失或者重复的任务，则由 FCB 位来标记承担。

从动站的 FCB 值置为 0 时，意味着从动站接收到了复位命令。

上行响应报文中，有无事件等待访问的控制通过 ACD 标记。

当 ACD 置为 0 时，意味着目前终端暂无事件数据等待访问；当 ACD 置为 1 时，意味着终端存在有重要事件在等待访问，同时附加信息域中事件计数器 EC 将记录等待访问的事件数。

要求访问位（ACD）的设置规则：

1. 当发生新的事件在访问等待时，那么 ACD 置为 1；
2. 当访问等待的事件执行完成后或者没有访问等待的事件，那么 ACD 置为 0。

当帧计数位（FCB）有效时，那么帧计数有效位（FCV）置为 1；当帧计数位（FCB）无效时，那么帧计数有效位（FCV）置为 0。

当启动标志位 PRM=1 时，功能码定义见表 2.5。

表 2.5 功能码定义（PRM=1）

帧的类型	发送/确认	发送/无回答	请求/响应帧			缺省
编码	1	4	9	10	11	0,2,3,12,13,14,15
功能说明	复位命令	用户数据	链路测试	请求 1 级数据	请求 2 级数据	备用

当启动标志位 PRM=0 时，功能码定义见表 2.6。

表 2.6 功能码定义（PRM=0）

帧的类型	确认	响应帧			缺省	
编码	0	8	9	11	1,2,3,4,5,6,7,12,13,14,15	10
功能说明	认可	用户数据	否认：无所召唤的数据	链路状态，请求 2 级数据，数据请求	备用	请求 1 级数据，确认请求

（三）地址域 A

行政区划码 A1、终端地址 A2、主站地址和组地址标志 A3 组成了地址域，格式定义见表 2.7。

字节顺序	1	2	2
地址域类型	主站地址和组地址标志 A3	终端地址 A2	行政区划码 A1
格式	BIN	BIN	BCD

表 2.7 地址域格式

（四）应用层定义

应用层（链路用户数据）格式定义见表 2.8。

表 2.8 应用层定义

应用层功能码 AFN
帧序列域 SEQ
数据单元标识 1
数据单元 1
.....
数据单元标识 n
数据单元 n
附加信息域 AUX

应用层功能码 AFN 由一个字节组成，定义见表 2.9。

表 2.9 应用层功能码

功能码 AFN	应用功能
00H	确认/否认
01H	复位
02H	链路接口检测
03H	中继站命令
04H	设置参数
05H	控制命令
06H	身份认证及密钥协商
07H	备用
08H	请求被级联终端主动上报
09H	请求终端配置
0AH	查询参数
0BH	请求任务数据
0CH	请求 1 类数据（实时数据）
0DH	请求 2 类数据（历史数据）
0EH	请求 3 类数据（事件数据）
0FH	文件传输
10H	数据转发
11H~FFH	备用

（五）帧序列域 SEQ

当数据信息无法在一帧内打包传输时，就需要将数据信息分成多帧进行传输，这时为了让接收端能够正确完整拼接这些拆分出来的帧，在信息传输前就要对拆分出来的每一帧进行数据单元标识，并且拆分出来的每一帧都作为独立的报文传输处理。帧序列域 SEQ 就是用于描述这些拆分出的帧之间的传输序列的变化规则。SEQ 定义见表 2.10。

表 2.10 帧序列域 SEQ 定义

D7	D6	D5	D4	D3—D0
TpV	FIR	FIN	CON	PSEQRSEQ

TpV 作为世间标签位，如果这一帧的附加信息域中没有时间标签 Tp，那么 TpV

置为 0;

TpV 作为世间标签位, 如果这一帧的附加信息域中有时间标签 Tp , 那么 TpV 置为 1; 。

FIR 帧标志用于标志拆分报文的第一帧, **FIN** 帧标志用于标志拆分报文的最后帧。如果报文被拆分, 那么拆分报文的第一帧中 **FIR** 就置为 1, 拆分报文的最后一帧中 **FIN** 就置为 1。

FIR、**FIN** 组合后各个状态的含义见表 2.11。

表 2.11 帧标志

FIR 帧	0	0	1	1
FIN 帧	0	1	0	1
说明	多帧: 中间帧	多帧: 结束帧	多帧: 第 1 帧, 有后续帧	单帧

如果需要对收到的报文进行确认时, 那么 $CON=1$;

如果不需要对收到的报文进行确认时, 那么 $CON=0$ 。

1. $PSEQ$ 为启动帧序号, $RSEQ$ 为响应帧序号, 共用一位标识^[21-22]。

2.5 低压宽带电力线载波通信模块设计

随着微电子技术和数字通信技术的发展, 从信号层面解决了通信的底层技术, 作为电力企业的应用, 还需要从工程层面进行实用化技术攻关。载波信号从电子线路输出, 需要耦合到电力上, 由于电力输送的是电能, 电压电流相比电子电路大几个数量级, 需要有相应的耦合方式才能实现信息的高效率、低成本的发送和接收。

智能载波通讯协议, 协议所有数据包的传输采用帧同步格式, 数据速率由载波通讯芯片类型决定。

信息发送格式定义:

单字节发送, 每字节数据采用高位在前, 低位在后的同步传输方式。

数据包格式定义见表 2.12。

表 2.12 数据包格式

Pro	Sync	Len	Datas
4-6	2	1	m

Pro 为预同步头, 用于捕获和跟踪接收到的扩频信号。

Sync 为帧同步头。对于载波而言, **Sync** 的值固定为 0x09AF; 对于串口而言, **Sync** 的值不唯一, 具体规定见表 2.13。

表 2.13 帧同步字定义

序号	Sync	下行功能	上行功能	备注
1	0x7E5A	数据流向 A 相	数据来自 A 相	
2	0x7E5B	数据流向 B 相	数据来自 B 相	
3	0x7E5C	数据流向 C 相	数据来自 C 相	
4	0x7E5D	主机命令模块	模块应答主机	
5	其它			一律透传

Len: 数据包长度, Len 的值表示后续数据包的字节数 m。

Datas: 数据包数据, 对于同步字 0x7E5A、0x7E5B、0x7E5C 模块将转发数据包, 而同步字 0x7E5D, 后续数据包将不被转发, 载波模块将数据包解释后做出相应的操作。

命令数据包是主机对载波模块进行数据操作用的。数据包包含命令字节 Func_A, 数据体 Datas 和校验字 Chk_Sum。

命令数据包定义如下。

表 2.14 命令数据包格式定义

Pro	Sync	Len	Func_A	Datas	Chk_Sum
FFFFFFFF	7E5D	1	1	n	2

Func_A: 命令字节。命令字节定义本包数据的功能操作, 具体定义如表 2.16。随 Func_A 定义的增加, 可以扩展模块的功能。

表 2.14 同步字 0x7E5D 对应命令字节 Func_A

序号	Func_A	下行命令	上行数据	备注
1	0x90	载波模块复位	载波模块复位	
2	0x91	远程模块通电	远程模块通电	
3	0x92	远程模块断电	远程模块断电	
4	0x93	设载波模块时间	设载波模块时间	
5	0x94	读载波模块时间	读载波模块时间	
6	0x95	载波数据下传	载波数据下传	遥控
7	0x96	载波数据下传	载波数据下传	遥调
8	0x97	载波数据读出	载波数据读出	遥信（可以主动上报）
9	0x98	载波数据读出	载波数据读出	遥测
10	0x99	载波数据读出	载波数据读出	
11	0x9A	载波数据读出	载波数据读出	

Chk_Sum 为数据包校验;

校验数据区是从 Fucn_A（含）开始，到 Chk_Sum（不含）为止的区间。

时间数据 Time：从 2000 年 1 月 1 日 0 时 0 分 0 秒开始以秒为单位计数 4 字节无符号整数，有效期 2000-1-1 00:00:00 至 2100-2-28 23:59:59，高字节在前。

2.5.1 通信模块化设计

通信系统相对与电力系统应用，具有独立的功能性，可以作为一个模块进行设计，便于实现制造、管理和应用。

模块化设计，一旦确定了模块的尺寸、接口、通信协议后，模块内部使用何种制式的通信技术就不重要了。无论使用扩频方案或是多载波方案或其他的方案，只要通信接口兼容即可实现通信。通信模块根据应用的需求，应设计为半双工工作模式，采用主从应答工作。为应对电力线通信的时变性，通信系统应具有中继通信的能力，以便在通信环境恶化时具有中继能力，将系统内部的每一个节点作为通信站点，实现中继通信的功能，拓展通信的覆盖面。

2.5.2 集中器模块设计

集中器模块作为通信主站地位，应具有较高的发射功率和较高的接收灵敏度，以实现通信的覆盖区域尽可能广，集中器主站的通信功率受国家标准对电力线载波的辐射电平限制，在符合标准的范围内，尽可能的提高主站通信的功率。在电力线环境下，载波载波的接收灵敏度很难提高，原因在于电力线上的干扰信号太强，信号往往被噪声淹没，无法通过放大或选频的方式通过电子电路来提高，较为有效的方案是通过扩频通信方案，通过软件方式改善通信系统的可靠性。

2.5.3 应用终端模块设计

应用终端通信模块受终端功率消耗的限制，发射功率限制在 2W 内，通信距离受到限制，要提高通信指标，需要具有中继通信的功能，在需要时，应作为通信中继站点，为附近的应用终端提供中继服务。除了不要的功能需要硬件支持外，通信的功能都由软件实现，以降低模块的硬件成本。

2.5.4 载波耦合设计

电力线载波工作环境不同于普通的无线通信，由于载波通信模块与电力线链接，必须考虑模块与电力线的接口能够承受电源高电压、负载改变产生的冲击脉冲、架空线路引入的雷电冲击的能力，还要实现载波信号的低衰减耦合，当然还要考虑成本，需要精心设计。

（一）电容耦合

通过电容的容抗，合理的利用频率特性，实现载波的信号的发送耦合与接收耦合，发送时，利用电容的特性，将载波信号耦合到 50Hz 的电力上，又能避免 50Hz 的电网电流电压对电子线路的影响。接收时，利用电容器的频率特性，阻止 50Hz 低频、通过高频的载波进入接收电路。电容耦合传输的是电压信号，适用于电力阻抗较高的情况，如高压载波，超高压载波等。

图 3.1 是典型的载波信号电容耦合电路，电路复合了接收和发送电路，由电容 C1 耦合收信号，高频变压器 T1 实现高压与设备间的隔离。图中参数适应低压载波信号耦合，如选择适合的电容 C1 和变压器 T1，可应用于 10kV 中压以及 35kV 高压线路的信号耦合。

电容 C2 用于接收信号耦合，电容 C3 用于发送信号的耦合。

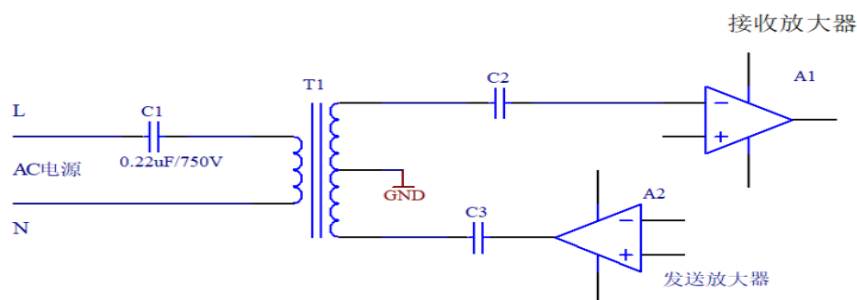


图 2.5 载波信号电容耦合电路

电容耦合是以电容 C1 对于工频交流的高容抗衰减工频电压，C1 对于载波频率的低容抗来传输信号的。对于工频， $X_c = 1 / (6.28 * 50 * 0.22e-6) = 14476\Omega$ ；对于 120kHz 的载波， $X_c = 1 / (6.28 * 120e3 * 0.22e-6) = 6.03\Omega$ ，二者相差 2400 倍。

（二）电感耦合

电感耦合，实际上是变压器耦合的特殊情形，通过电感的互感特性，实现载波的信号的发送耦合与接收耦合，并方便的实现载波电路与高压电源侧的电气隔离。电感耦合特别适合传输电流信号，适用于电力阻抗较低的情况，如电缆的屏蔽层载波传输

等。见图 2.6，图中 T2 为电感耦合器，环形磁芯上绕有接收和发送线圈，

需要传输载波信号的电力穿过磁环，如果需要提高传输的信号电压，可以多穿绕两圈，这样载波信号就耦合到电力上，同时实现了电力于载波设备的电气隔离。

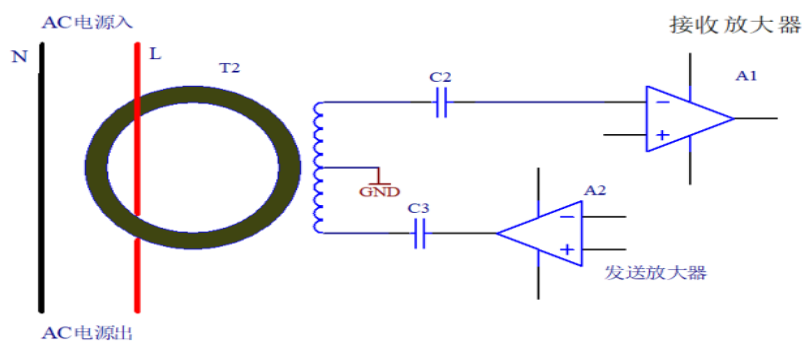


图 2.6 载波信号电感耦合器及电路

电感耦合采用电流耦合方式，图中 T2 为电感耦合器，初级电力线 1 匝，次级一般 20 匝，这样具有 20 倍的电流提升，适合低阻抗的电力线应用，如电缆屏蔽层传输等。

电感耦合的优点是能传输低抗的大电流信号，可以将信号耦合到电缆的屏蔽层上，也可以将整根电缆穿过耦合电感，将整根电缆作为传输线使用。也可以将高频磁环做成对称的两半，现场安装使用时可以分开，将电缆或电线放入再闭合磁环，方便工程施工。

（三）电力载波信号的发送

电力载波的发射性能，主要由发射功率决定，在设备功耗有限的情况下，提高功放的效率显得特别有效，对于电磁辐射要求较高的情况，可以采用谐振功率放大器，发送的载波信号谐波较少，电磁波频带外的干扰较少。

图 2.7 是载波发送电路 1，为谐振功率放大电路，在 12V 电源，工作频率为 185kHz 时，输出功率约为 1W。N3、T1、C3 组成谐振第一级谐振放大器，用于推动功放级。N4、N5、C1、C2 和 T2 组成推挽功放。

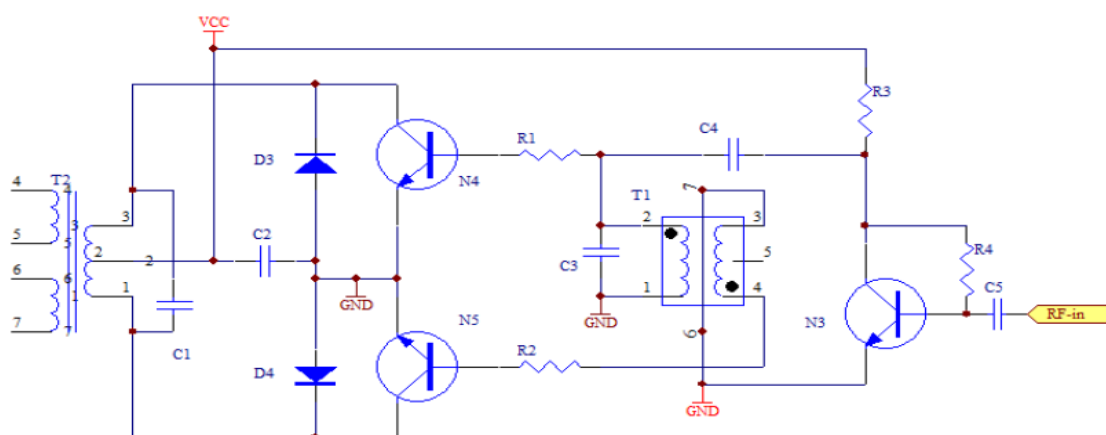


图 2.7 载波功放电路 1

载波发送电路 1，为谐振型功率放大电路，电源 VCC 选 12V，工作频率为 185kHz 时，输出功率约为 1W；N3、T1、C3 组成谐振第一级谐振放大器，用于推动功放级；N4、N5、C1、C2 和 T2 组成推挽功放，谐振放大器具有较好的选择性。

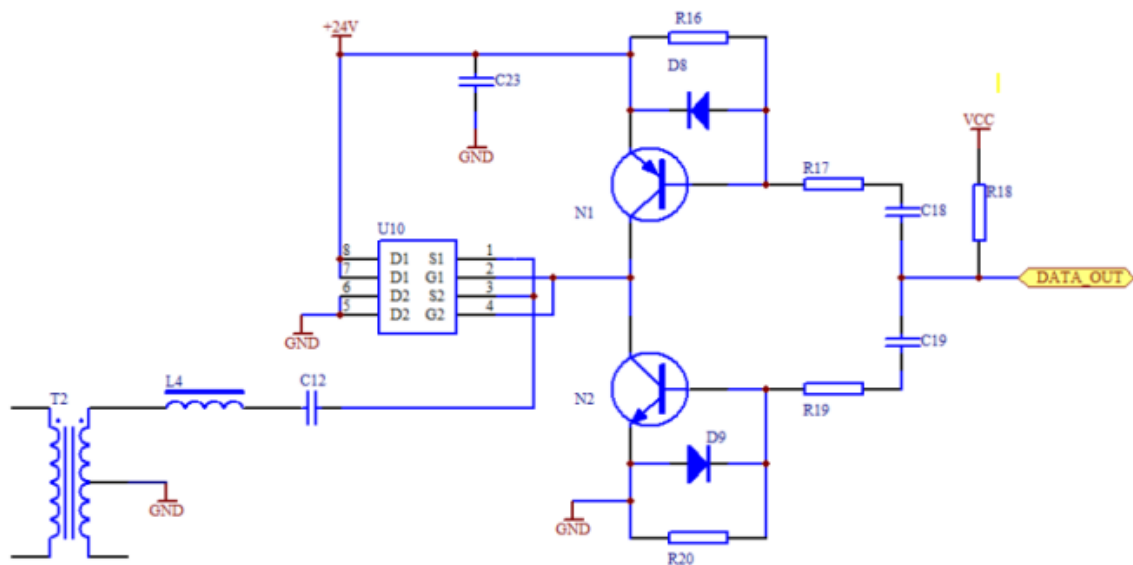


图 2.8 载波功放电路 2

载波发送电路 2，为 D 类功率放大电路，在 12V 电源，工作频率为 120kHz 时，输出功率约为 2W。N1、N2 为互补三极管推动级；U10 互补场效应对管，内部各集成 1 只 PMOS 和 NMOS 管，耐压 100V，漏极电流大于 1.5A；U10 组成功率放大级，L4、C12 与 T2 组成输出级。该电路工作在 0 偏压状态，效率接近 100%，该放大器如工作电源 20V 时能输出 7W 左右的功率，效率高开关管发热小。

（四）电力载波信号的接收

电力载波接收电路要求接收损耗小，具有一定的通频带，有一定的选择性，一般使用谐振选频电路加上一定增益的接收放大器。由于电力的噪声很大，放大器对于接收性能的贡献不大，接收性能主要由载波通信的调制解调方案决定，如采用宽带的扩频通信方案、OFDM 通信方案等，采用常规的选频放大器，带通滤波器等效果有限。

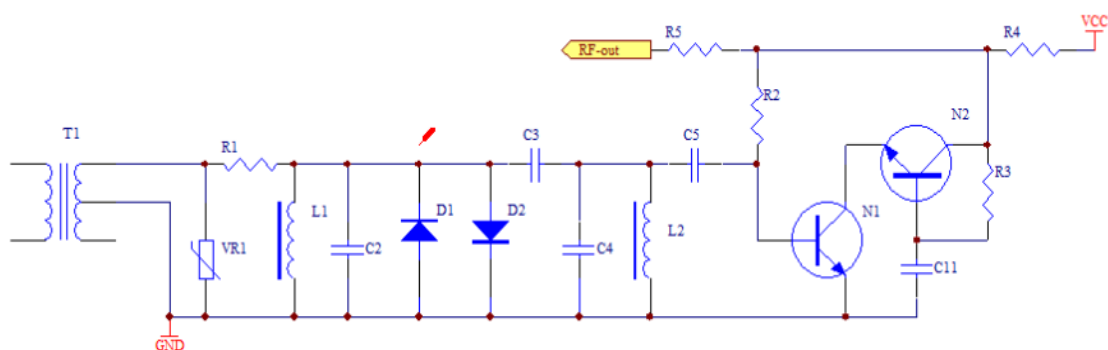


图 2.9 载波接收电路 1

某载波接收电路，应用于扩频通信，工作频率 120kHz，带宽 $\pm 15\text{kHz}$ ，接收采用了双 LC 谐振回路，第一级 L1、C2，第二级 L2、C4 双调谐电路，C3 是双调谐耦合电容；后续采用一级由三极管 N1、N2 组成的共射共基放大电路，增益约 10dB，信号由 RF-out 输出至载波接收芯片。压敏电阻 VR1，二极管 D1、D2 用于浪涌保护，防止接收芯片被雷电等高压浪涌损坏。

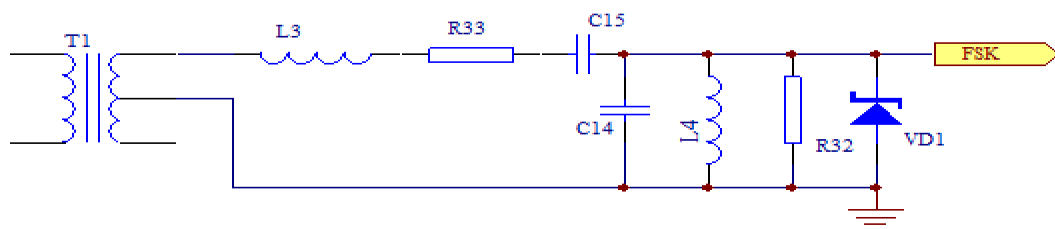


图 2.10 载波接收电路 2

载波接收电路 2，应用于窄带通信方案，工作频率 185kHz，接收采用了 LC 带通滤波电路，回路 L3、C15 和 L4、C14 组成滤波电路，滤波后的信号未经放大，直接由 FSK 送至载波接收芯片，R33、R32 用来降低 Q 值。二极管 VD1 用于浪涌保护，防止接收芯片被雷电等高压浪涌损坏，变压器 T1 用于隔离工频电压，并实现载波耦合。

2.6 低压配电网低功耗远距离技术方案研究

依据中国南方电网公司通信单元技术规范，载波模块功耗要求见表 2.17。

表 2.17 载波模块功耗要求

通信单元类型	单相模块		三相模块		路由模块	
	窄带	宽带	窄带	宽带	窄带	宽带
静态功耗	0.25W	0.6W	0.35W	0.8W	1W	1W
动态功耗	1.5W	1.5W	2.5W	2.5W	6W	6W

从表中可以看出，静态功耗要求中除路由模块外，单相模块和三相模块的宽带载波的功耗几乎窄带载波功耗的两倍；动态功耗要求中，宽带载波功耗和窄带载波功耗一致。换句话说，每年静态功耗中宽带载波通讯传输损耗的电量将是窄带载波通讯损耗的两倍。这样的损耗不容小觑，降低宽带运营商的能耗，提出低功耗方案势在必行。

2.6.1 低功耗技术方案

由于电力线载波通信采用基带传输方式，无射频部分，数字电路晶体管是一种开关电路。处于接收状态下的载波模块所消耗的电量与宽带电力线载波模块静态功耗正相关，由此可以推出，降低载波模块在接收状态下的电流将会对宽带电力线载波模块静态功耗的减少有促进作用^[21]。本节主要从载波芯片的优化设计及模块电路的优化设计进行宽带电力线载波模块静态功耗降低的研究。

（一）载波芯片优化设计

如果运用较低阶的调制技术，降低采样频率与数据传输速率，不仅降低了载波芯片的功耗，还减少了载波芯片的成本控制工作频段。所以我们在优化设计时，就把芯片的基本工作频段控制在 2—12 MHz 的范围内，同时采用小带宽模式合并载波屏蔽方式时，使得芯片在 6 MHz 以下也可工作^[23]。然后物理层中，使用动态切换数据链路时钟的方式对数据流进行管理，达到物理层传输功耗减少的目的。在数据链路层中，为了避免访问冲突采用了数字调制技术（TDMA）和带有冲突避免的载波侦听多路访问技术（CSMA/CA）相结合的信道访问机制。同时，将调制电路、数模转化器（DAC）等不必要的电路进行关闭，将芯片 IO 设置到高阻态，减少功耗和漏电。当通信信道空闲时间，通过降低数字信号处理器（DSP）和微控制器（MCU）时钟使得处理器达到低功耗模式，只有在接收端收到信息号信息或者串口有数据通信时，处理器才会被激活。

采用上述优化方法,可以降低电流消耗,可有效控制宽带电力线载波模块的静态功耗^[23]。

(二) 模块电路优化设计

关闭不必要电路,关闭外围的功率放大器,可以有效降低接收模式下的电流功耗。

而采用拉升型 DC-DC 电源芯片电路替代 LDO 线性稳压芯片,可以将供电电压提升到 12V,同样能够减少电流功耗。

通过上述方法对载波芯片和模块电路进行优化后,试验得出载波芯片的静态电流可控制 20mA,相比于未优化的宽带载波芯片,功耗节省超过 30%。

2.6.2 远距离技术方案

载波信号传输距离受线路负载、信号衰减、线路干扰等关键因素影响。学术界还没有系统的模型可以对载波信号的远距离传输进行定量分析。电网运营商主要从控制载波信号的传输电平、提高载波接收端的接收灵敏度、优选合适的频率信号等方式,获得电网复杂环境下远距离通信的最优效果。

国家电网公司通信单元技术规范中载波模块的发射电平限值要求见表 2.18。

表 2.18 载波发送电平限值

窄带载波(发送电平限值)	宽带载波(功率频谱密度)	工作频率
120dB(μ V)	-45dBm/Hz (≈ 107 dB (μ V))	9kHz

通过测算发送电平以及接收灵敏度的差异,可得出窄带载波与宽带载波在抗衰减方面的性能差异,详见表 2.19。

表 2.19 载波发送电平限值

	窄带载波	宽带载波
抗衰减能力(dB)	>110	<97

窄带载波的抗衰减能力强于宽带载波 15dB 左右,在理想的无噪声且低阻抗环境下,窄带载波理论传输距离大于宽带载波。

实际真实环境不仅要考虑阻抗的影响还要考虑噪声的影响,由于宽带载波处于高频频段,阻抗及噪声对其影响要小于窄带载波,因此宽带载波的抗衰减劣势会在真实复杂环境中表现的不明显^[23]。

国家电网公司的宽带载波通信互联互通标准中,既考虑到真实情况的复杂性,又考虑传输效率和传输距离,载波模块应支持多个频段,目前支持表 2.30 所列两种载波频段。

表 2.20 载波发送电平限值

	频段 1	频段 2
频段	1.95Mhz~11.96Mhz	2.44Mhz~5.6Mhz
传输速率（TMI=8）	830Kbps	290Kbps

2.7 本章小结

本章首先对通信系统的组成、信道、数字通信系统和信息传输方式进行了阐述。由于低压电力线不是专门的通信线路，它还承担着电能量输送供应的任务，为了能更好的利用低压电力线进行载波通信，了解电力电力线的信道特性变得尤为重要。通过文献的查阅及学习知道，电力线载波信道输入阻抗与信号传输频率正相关，各种噪声叠加后会加到电力线通道上，电力线载波通信信号的衰减与通信传输距离和信号频率有关。了解到这些传输特性后，我们采用了 M.Zimmermann 与 Klaus Dostert 的自顶向下建模法，并结合 Middleton A 类噪声模型进行随机脉冲噪声的模拟，建立了低压宽带电力载波信道模型为后续通信仿真提供支撑。就低压宽带电力线载波通信系统物理层的调制解调过程进行了分析。依据 GB/T18657.3—2002 规定的三层模型对通信帧格式、传输规则和链路层进行了定义。最后从低压配电网复杂环境中的功耗优化和远距离宽带载波传输优化方面进行分析论述并提出优化方案。通过上述对载波芯片和模块电路进行优化后，试验得出载波芯片的静态电流可控制 20mA，相比于未优化的宽带载波芯片，功耗节省超过 30%。

第三章 智能电表设计与优化

3.1 引言

智能电表在中国的应用已有 10 多年的历史。许多学者和工程师长期致力于智能电表的研究和改进^[24-29]。在提升智能电表性能和功能时，一些机构和厂家开始探索其他基于智能电表的终端传感功能的应用开发^[30-34]，例如负荷识别、防盗电保护、线路监测等。

本章依据 IR46 标准的双芯电能表主控关键技术及核心指标，使用模块化思想，进行了三相智能电表的设计^[35]，主要通过计量和管理的组件集成，以期解决了原来电表故障直接更换电表的问题，同时实现智能电表的在线升级^[36-37]。

3.2 智能电能表设计与优化

3.2.1 需求分析

从电网业务出发智能电表的功能需求如图 3.1 所示。

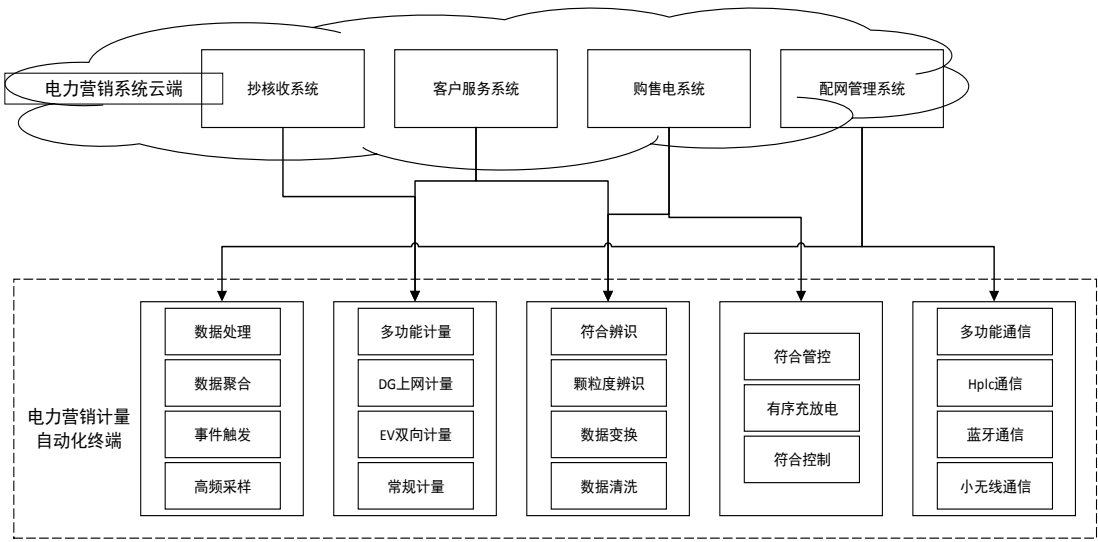


图 3.1 智能电表功能需求分析

随着电力“长网分离”改革深入推进，电力营销业务迫切需要智能电表不仅能够实现多功能计量，和更复杂多元的计费方式，还要求智能电表具有负荷监控、用电安全监视的能力。另外，电力物联网建设加速推进，智能电表在提升采样频率和采样精度

的同时，本地数据处理、事件控制等功能的要求也在提升。

（一）电能计量

1. 功率测量功能，可记录并存储正向、反向有功电能数据。有功电能的组合公式可以扩展。出厂时默认设置正向有功电能和反向有功电能的和为组合有功电能；
2. 按照尖峰、峰、平、谷和低谷 5 个时段分别记录用电量，并能够对各时段用电量进行求和和存储；
3. 能够按照用电类别，电费费率分别计算求和并存储至少 1 年以上的用电量，出厂时默认设置每月 1 号零时将上月用电量反转入历史累积用电量，也可手工设置为每月 1 至 28 号的任意时点进行转入累积；
4. 当进行统一结算时发生停电，那么复电后智能电表会自动上传结算日的电能数据，最多可补充上传 12 次。

（二）测量及监测

1. 智能智能电能表在监测、显示和记录当前的用电情况（电压、电流（含零线）、功率、功率因数等）时，引用误差不得超过 $\pm 1\%$ ；
2. 智能电表能够测量 $0.6U_n \sim 1.2U_n$ 范围内的电压；智能电表能够测量 $0.05I_b \sim 1.2I_{max}$ 范围内的电流；智能电表能够测量 $0.6U_n \times 0.05I_b \sim 1.2U_n \times 1.2I_{max}$ 范围的起动功率；智能电表能够测量 $47.5\text{Hz} \sim 52.5\text{Hz}$ 范围的频率；
3. 在智能电表电压和电流测量范围内测量功率因数^[39]。

（三）事件记录

1. 智能电表能够记录一下 10 种事件：
 - (1) 智能电表清零发生的时间和当时的用电数据；
 - (2) 智能电表应记录软件程序更新的日志，包括程序更新的次数、最近几次程序更新的明细、程序更新的原因、操作员 ID 等；
 - (3) 智能电表应记录最近 10 次校时的日志，包括校时总次数、操作员 ID 等；
 - (4) 智能电表应记录最近 10 次停电的日志，包括停电的总次数、累计停电时间、停电发生的时间、复电时间等；
 - (5) 智能电表应记录最近 10 次拉合闸的日志，包括拉闸时间、拉闸时的用电情况、合闸时间，合闸时的用电情况等；
 - (6) 智能电表应记录最近 10 次开盖的日志，包括打开表盖的总次数、开盖发生的时间、开盖结束的时间；

(7) 智能电表应记录最近 10 次过流的日志, 包括应过流总次数、过流总累积时间、过流发生的时间、过流发生时的用电情况、过流结束的时间、及过流结束时的用电情况等;

(8) 智能电表应记录最近 10 次电源异常的日志, 包括电源异常的总次数, 电源异常发生的时间、电源异常发生时的用电情况、电源异常结束的时间、电源异常结束时的用电情况。电源异常的定义是, 当只智能电表的外部供电电压在智能电表的工作电压范围内 ($0.78U_n \sim 1.15U_n$) 时, 由于智能电表内部的工作电源异常导致智能电表芯片进入到大于 1 秒时间的低功耗状态;

(9) 智能电表应记录时钟电池欠压累计时间的日志, 包括时钟电池欠压事件发生时间、时钟电池欠压发生时的用电情况等;

(10) 智能电表应记录最近 10 次负荷开关误动作的日志, 包括负荷开关误动作事件总次数、负荷开关误动作发生的时间、负荷开关误动作发生时的用电情况、负荷开关误动作结束的时间、负荷开关误动作结束时的用电情况。负荷开关误动作的定义是, 如果智能电表内负荷开关实际状态与智能电表发给负荷开关的命令状态不一致, 且状态保持 5s 以上, 那么发生负荷开关误动作事件^[39]。

2. 根据 DL/T645—2007 标准要求, 智能电表可设置重要事件上报库, 当有其他重要事件发生时, 智能电表通过附加信息的方式对发生的重要事件进行主动上报。

(四) 阶梯电价

智能电表可以在不同时段时间设置不同的阶梯电价套餐; 每套阶梯电价中可以按时区执行不同的阶梯电价, 所以, 每套阶梯电价中应可以至少设置 2 张阶梯电价表^[40]。

(五) 冻结功能

当停电时发生了定时冻结、瞬时冻结、约定冻结、日冻结和整点冻结时, 复电后需要对最后一次冻结数据进行补录。

(六) 负荷记录

智能电表应能够设置负荷记录的周期 (间隔时间), 出厂设置默认为 15min, 不同的负荷记录周期可以不同; 当负荷记录周期为 15min 时, 电能表要能连续存储 3 天的总电量、电压、电流、频率、功率、功率因数等。

(七) 电表清零

智能电表应记录电表清零的日志, 对清零操作进行授权验证和安全校验。

（八）信号输出

1. 智能电表的光脉冲输出应满足 GB/T17215.211—2006 的要求；智能电表的电脉冲输出应满足 GB/T15284—2002 的要求。

（九）费控功能

1. 智能电表的费控功能可以分为本地和远程两种方式，出厂默认设置是远程方式；

2. 采用本地费控方式时，应满足以下要求：

(1) 当计量点费用余额到达设置的限额提醒时，电能表以声光方式对用电客户进行提醒；如果允许用电客户进行透支用电，那么当到达透支限额时，智能电表主动向负荷控制开关发出中断供电的信号；当用电客户进行了电费交纳，且所缴电费在扣除透支金额后有结余，计量自动化系统则会将智能电表置为允许合闸状态，并将合闸工作单发给现场工作人员，由现场工作人员进行合闸供电操作，并现场安全检查；

(2) 当智能表供电停电时，该计量点费用余额和其他重要信息应能在智能电表上保存至少 10 年；

(3) 智能电表的显示位决定了允许存入的最多的预付电费；

(4) 对于插卡计费的智能电表，但用电客户插入 IC 卡后，智能电表将卡内的余额信息反写到电表，并通过通信与电力营销系统进行数据统一^[41]；

(5) 当智能电表插入 IC 卡后，应在 3-10 秒内完成卡上数据的读写，读写后需对读写完成情况进行提示。

3. 当费控方式为远程时，电力营销系统对计量进行计费 and 拉闸控制，智能电表仅仅实现电能量记录和反馈。电力营销系统根据计量自动化采集回的用电量和用户的电价套餐，自动计算用电客户的当时用电费用，并根据用户用电透支限额设置，自动向智能电表发送断电拉闸指令；当用电客户完成电费缴纳和预购电后，电力营销系统又再次向智能电表发出合闸复电的指令。

3.2.2 智能电表总体方案

智能电表采用模块化设计思路，依据 IR46 的标准，各个模块可独立运行也可集成使用，模块间关联松散，通过统一接口集成后，又可协调工作。

综合了上述智能电表的需求，我们将智能电表划分为计量模块、管理模块、计算

模块、负控模块四大模块，分别实现处理智能电表的计量类功能需求，管理类功能需求，计算分析控制类功能需求，负控类功能需求。计量模块为智能电表的基础功能模块，主要承担计量点电能计量的任务；管理模块承担智能电表的功能设置，管理维护的任务；计算模块根据用电客户负荷管理要求，计算、分析、存储用电现场的用电信息，必要时与主站进行通信；负控模块主要完成有序充电策略的设置，有序充放电的控制和负荷控制任务。智能电表的总体方案如图 3.2 所示

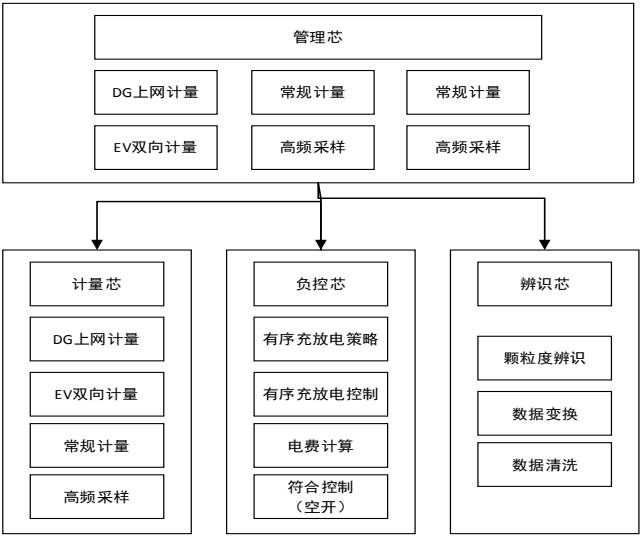


图 3.2 智能电表总体方案

四个模块如乐高积木一般，可根据实际应用需求进行组合拼插使用。其中管理模块和计量模块是智能电表的标准功能模块，实现了智能电表计量的基本功能，根据应用场景的需求，计算模块和负控模块可作为选择配置。当智能电表投运后，发生硬件故障时，可对对应模块进行不拆表更换检修；硬件升级或器件更换时，可以在现场直接对模块进行更换，不仅降低表计更换、升级的操作时间，还减少了因表计整体更换带来其他问题的几率，表计维护管理的成本大大降低。当电能表软件需要进行升级时，可以通过刷新模块程序进行单模块的升级，也可进行远程升级，大大提升了智能电表的使用寿命，降低了智能电表的使用成本。

3.2.3 硬件设计

多芯智能电表功能丰富，扩展方式灵活，满足电力物联网多种应用场景，因此对电表的硬件性能提出了更高的要求，相对传统智能电表，多芯智能电表硬件载体组织模式需要全新设计。智能电表各模块之间采用 UART 及 SPI 串口通信，通信中使用电

气隔离进行保障。

（一）计量模块

智能电表的基本功能是计量，那么计量模块就是智能电表的基础。智能电表的计量模块除了实现传统电表的电流计量、电压计量以及测量数据的传输外，针对日益复杂多远的用电需求，智能电表的计量功能也更加丰富。电路是智能电表最重要的基础电路，主要实现电流、电压的采集、计量以及采样数据的传输。相比于以往的计量电路，新一代电能表的计量电路相对功能较为丰富，通过使用系统级芯片，搭载嵌入式功能软件，然后按照计量功能对软硬件进行封装，最后集成为一个功能可以进行配置，灵活强大的模块。计量模块主要电路结构如图 3.3 所示。

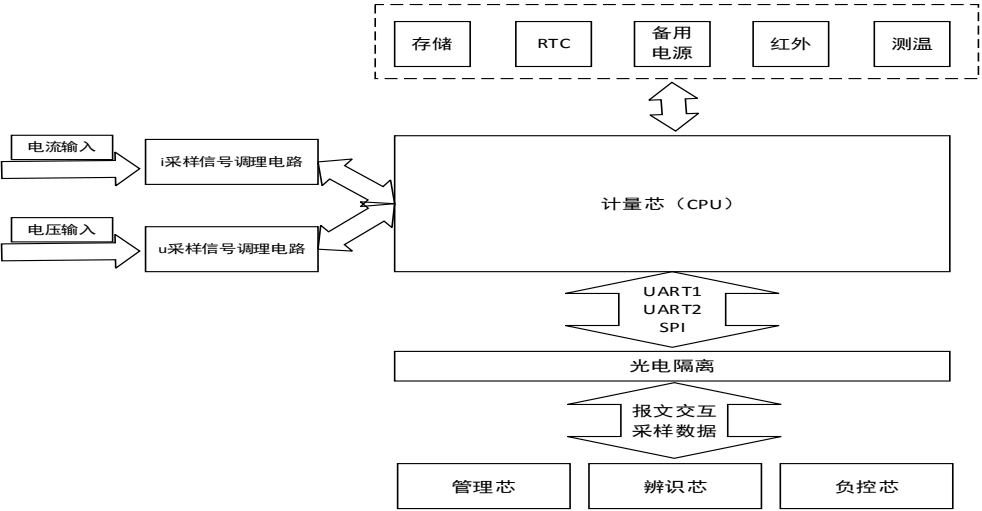


图 3.3 计量模块电路结构

用电现场高频采样将监测到的电流和电压通过信号调整电路后交给计量系统级芯片进行数据计算和处理。数据交互电路的设计使用高速的 SPI 口进行电流和电压数据的接入和传输，通过灵活配置 UART 串行通信口，来完成其与计量系统级芯片的信息交互；监测到的数据同时能够支持计算模块、负控模块中高级算法及用电趋势分析的需要。同时，为了防止输入工频电压和电流对智能电表的干扰和系统稳定性的影响，计量模块的测量电路和管理识别电路间需要采用光电隔离。

（二）管理模块

管理模块承担智能电表的功能设置，管理维护的任务，包括事件记录、负荷控制显示、数据冻结、负荷控制等。管理模块设计电路结构见图 3.4。

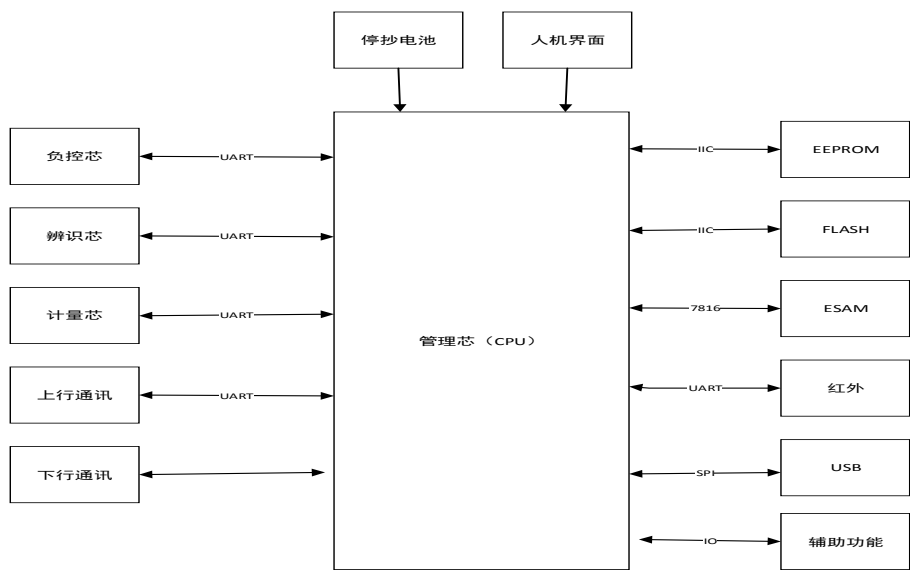


图 3.4 管理模块电路结构

管理模块电路主要包括管理芯片，数据存储子电路、人机交互子电路、通讯子电路、接口子电路等。这些子电路的集成度非常高，外部接口子电路的功能也十分的丰富。

可擦可编程只读存储器电路是存储电路中承担电表配置参数存储任务的子电路，他通过集成电路总线与管理芯片进行通信。其中非易失性存储电路向可擦可编程只读存储器电路提供控制程序存储，升级程序的存储空间，并通过串行外设接口与管理芯片进行通信。同时，管理芯片通过智能 IC 卡接口与 ESAM 加密通信电路实现操作授权校验和安全认证等功能。

智能电表外部功能按键与显示器等属于人机交互子电路实现的功能，显示器也从传统的数码显示升级为了 LED 显示。

在通信子电路中，与主站的数据传输由上行电路承担完成，而集中采集与数据读取的任务由下行电路承担完成。

外部接口和内部接口构成了接口电路，外部几口中，通过外部串行接口或者 USB 几口，可以实现管理模块的数据导入导出和软件程序的的在线升级。内部接口通过 UART 串口可以成功获取到计量模块的现场计量数据，通信模块的通信情况数据，计算模块的的结算结果和数据分析结论数据，结合负控策略并对负控模块发出负荷控制指令等。

（三）计算模块

为了满足用电现场用电情况复杂，计算算法高效，计算模块的计算芯片配置和存

储要求在智能电表要求最高。计算模块通过其外部的串行接口和 UART 串口实现与管理模块的通信，例如配置智能电表的运行参数，将计算出的负荷辨识结果传递给管理模块，由管理模块依据负控策略发出指令等。同时，计量模块高频采集的用电现场的电流、电压也可通过外部的串行接口传递给计算模块，然后由计算模块进行数据的识别、分析和处理。计算模块与其他模块数据传递结构图如 3.5 所示。

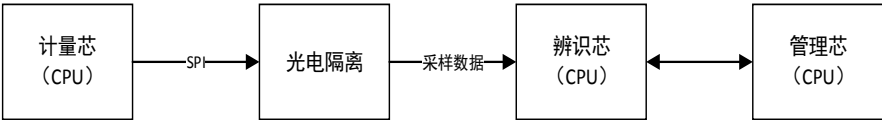


图 3.5 计算模块数据传递结构图

（四）负控模块

负控模块电路模块主要实现有序充电策略管理、费控实现、智能断路器接口等负荷控制功能，电路整体架构与辨识模块类似，负控模块电路结构如图 3.6 所示。其中，负控芯片通过 UART 与管理芯片进行通信，依据负荷控制策略、监测费控实现情况，包括监测智能断路器的当前状态，控制智能断路器的分闸合闸等。



图 3.6 负控模块电路结构

3.2.4 软件设计

（一）软件框架设计

嵌入式操作系统具有兼容性好、互操作性、互换性、可裁剪性和可扩展性，软件层次化、各层接口标准化设计，应用广泛，智能电表软件基于嵌入式操作系统开发，整体软件框架如图 3.7 所示。

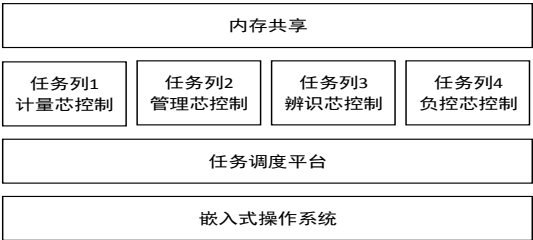


图 3.7 智能电表的嵌入式软件框架

智能电表中的软件为嵌入式软件，软件功能包括在运行过程中为智能电表分配所需的资源，当电能表有多个任务需要处理时，软件通过算法均衡任务处理所需的资源

并进行任务处理的先后顺序调度。当计量模块、管理模块、计算模块、负控模块发出任务时，任务调度软件平台通过任务调度算法，允许进行不同任务队列的执行与切换，指示中央处理器优先运行处于就绪状态且当前优先级最高的任务。同时，为了提高中央处理器的利用率，建立了轮换调度的算法，即允许不同的任务使用相同的优先级。内存共享软件算法，将任务进了分类标识，形成计量任务任务列、管理任务列、计算任务列和负控任务列。依据任务队列排队情况和任务列优先级，对各个任务里所需的计算资源进行内存和资源分配。

各种任务分类依据如下：

与计量模块相关的任务处理，例如电能累计求和、现场计量数据采集、计量数据上报及接收、现场计量故障日志、现场其他电气参数传输等，归属于任务列 1 计量模块任务列；

与管理模块相关的任务处理，例如用电现场费率计算、现场用电数据冻结、人机交互设置、软件在线升级、时钟管理等，归属于任务列 2 管理模块任务列；

与计算模块相关的任务处理，例如计算参数初始化、计算模块当前的运行状态监测、软件计算算法升级、计算处理结果上传等，归属于任务列 3 计算模块任务列；

与负控模块相关的任务处理，例如负控策略制定导入、负控模块参数初始化设置、断路器状态监测与指令执行、用电现场故障上报等，归属于任务列 4 负控模块任务列。

（二）通信信息交互设计

多模块智能电表业务涉及面广，对外通讯类型多样，因此需要构建对应通信信息交互模型，满足多样化的集成通信需求。信息通信交互模型如图 3.8 所示。

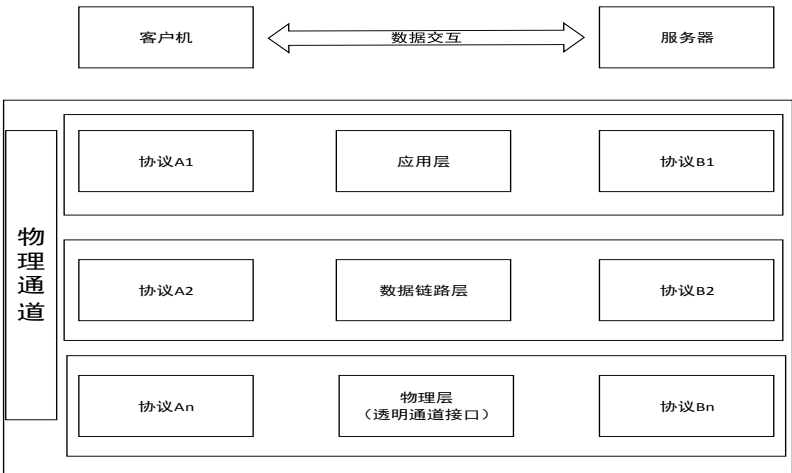


图 3.8 智能电表信息通信交互模型

智能电表的信息通信主要依据 DL/T698.45 标准和 DL/T645-2007 标准，在应用层、

数据链路层和物理层分别制定通信协议。根据 DL/T698.45 标准，对接口类业务及功能进行统一的数据结构设计，使用唯一标识对数据对象进行标记。为了实现现场用电情况数据全生命周期跟踪管理，同时保证在信息通信过程中数据安全、独立、完整、有效，需要在智能电表和集中器之间制定统一透明的数据接入集中协议。另外，对于未来数据种类扩展的需求，主站服务器应能定义数据格式、量纲等并通过通信同步到智能电表上。

智能电表和主站服务器有各自独立的运行进程，通过应用层的服务协议，通过数据单元（APDU）在数据链路层进行现场用电数据的传输。

（三）数据交互方式设计

客户机和服务器的数据交互方式可以分为面向应用连接、请求 / 响应、通知 / 确认等类型。

面向应用连接要求智能电表和主站服务器通信开始之前建立预连接，换句话说就是通信的信道首先必须联通。当预连接建立成功后，默认一个最低权限的应用连接也已经建立，这就意味着智能电表和主站服务器之间已经可以进行数据交换了。当智能电表需要主站服务器提供更高权限的服务时，智能电表就需要向主站服务器发起一个建立更高权限应用连接的请求。当主站服务器收到智能电表发出的服务请求后，主站服务器会想智能电表提供远程服务的相应，这也就是请求 / 响应类型。这是智能电表和主站服务器通过一次“握手”完成了服务相应的请求和相应，更高权限的应用连接也成功建立。当智能电表按照预先制定的主动上报机制向主站服务器上信息时，主站服务器在收到智能电表上报的信息后还要向智能电表发出服务确认，确认信息已接收，根据实际情况，智能电表在收到确认后可继续使用该高权限连接与主站服务器进行通信，也可向主站服务器发出断开连接的请求。

3.2.5 优化验证

应用本文研究的多核智能电表设计思想，尝试开发多核智能电表矩阵和各模块片模块。在实验室环境下对多核智能电表样机进行性能测试，主要指标测试结果分为整表的性能指标和对应控制的性能指标两部分，详见表 3.1。

表 3.1 多功能智能电表性能测试结果

项目	性能类型	指标
单表设备	静态功耗/W	<0.5
管理模块	CPU 负荷率/%	<15

	内存占有率/%	<25
	RTC/ppm	硬件补偿, < ± 5
计量模块	计量精度	有功计量 < $\pm 0.1\%$ (5000:1 动态范围)
	谐波分析/次	41
	波形输出/(点/周波)	34—126
计算模块	计算精度/%	87
负控模块	有序充电通讯成功率/%	100

3.3 本章小结

本章首先从能源互联网全面建设对智能电表的新需求出发,从智能电表的电能计量、测量及监测、事件记录、阶梯电价设置、冻结功能、负荷记录、电表清零、信号输出、费用控制等九个方面的需求进行分析梳理。然后依据 IR46 标准的双芯电能表主控关键技术及核心指标,使用模块化思想,进行了三相智能电表的设计^[35]与验证。

智能电能表设计了计量、管理、计算和负控四个模块,四个模块如乐高积木一般,可根据实际应用需求进行组合拼插使用。其中管理模块和计量模块是智能电表的标准功能模块,实现了智能电表计量的基本功能,根据应用场景的需求,计算模块和负控模块可作为选择配置。当智能电表投运后,发生硬件故障时,可对对应模块进行不拆表更换检修;硬件升级或器件更换时,可以在现场直接对模块进行更换,不仅降低表计更换、升级的操作时间,还减少了因表计整体更换带来其他问题的几率,表计维护管理的成本大大降低。当电能表软件需要进行升级时,可以通过刷新模块程序进行单模块的升级,也可进行远程升级,大大提升了智能电表的使用寿命,降低了智能电表的使用成本。

通过验证试验,智能电表工程样机不仅符合 IR46 标准,同时各个模块独立运行稳定,集成后整机功耗很低。

经测试智能电表整机静态功耗低于 0.5W,实现了低功耗的控制;管理模块指标是 CPU 正常运行的负荷率小于 15%,内存占有率小于 25%,管理模块系统的资源占用留有充足的裕量,为多模块智能电表的应用扩展提供了额外的硬件资源;计量模块以计量精度和时钟精度作为性能评估指标,计量精度 < $\pm 0.1\%$,满足 0.2 级电表的要求,计量模块可以对高次谐波进行分析,最高可达 41 次谐波;为满足负荷辨识等应用,计量模块的原始波形输出能力也是测试的重点,经试验测得,计量模块的波形输出在 34 点 / 周到 126 点 / 周波之间,满足负荷计算等扩展应用的要求;计算模块主

要是实现居民用户的用电负荷计算，计算精度是模块片计算能力的主要衡量指标，测试中平均计算精度大于 87%；应用有序充电通信成功率来衡量负控模块的上传下达能力，实验中负控模块通信成功率高达 100%。

智能电能表设计了计量、管理、计算和负控四个模块，四个模块如乐高积木一般，可根据实际应用需求进行组合拼插使用。其中管理模块和计量模块是智能电表的标准功能模块，实现了智能电表计量的基本功能，根据应用场景的需求，计算模块和负控模块可作为选择配置。当智能电表投运后，发生硬件故障时，可对对应模块进行不拆表更换检修；硬件升级或器件更换时，可以在现场直接对模块进行更换，不仅降低表计更换、升级的操作时间，还减少了因表计整体更换带来其他问题的几率，表计维护管理的成本大大降低。当电能表软件需要进行升级时，可以通过刷新模块程序进行单模块的升级，也可进行远程升级，大大提升了智能电表的使用寿命，降低了智能电表的使用成本。

第四章 载波通信系统测试与性能评估

4.1 引言

电力线载波应用推进的同时，对载波通信系统的性能评价也提出了相应的需求，虽然云南电力研究院建设的自动化实验室，能对载波系统进行必要的评价，但由于设备庞大、设备复杂，不利于批量化的检测；系统投资较大，不利于推广，特别是针对供电局或供电公司推广应用困难就更大了。在云南电力研究院已建设的自动化实验室作为技术参照，将天龙经纬公司载波表出厂自动检测台的技术加以综合，开发一套结构合理、检测全面、价廉物美，能实现对载波电能表有效评价的测试平台，将有助于推动载波表的评价、选型和风险预期。

4.2 载波通讯系统性能指标及测试

通过对电源通道的电气参数测量，取得被测设备在不同电压下的电气参数，以及通过编程衰减接收功率与载波频率分离的灵敏度测试。载波用于输入和输出、间隔裕度、频谱测量，以及通过编程衰减除非用功率解离载波频率进行接收灵敏度测试，用于处理常规无线电信号的载波可采用测量技术手段来实现更大精度和数字化^[42]。

4.3 载波通讯系统评估平台组成

电力载波通信产品评价系统由载波产品测试工位、工控机、电力载波分离模块、噪声信号源、阻抗模拟器、数控衰减器、电力阻波器、信号耦合器、交流电参量采集器、三相可调交流压电源、固定 20A 的电流源等组成。完成后的电力载波评估系统包括有抄表控制器接口、频谱仪接口等通用接口。

4.3.1 装置台架组成

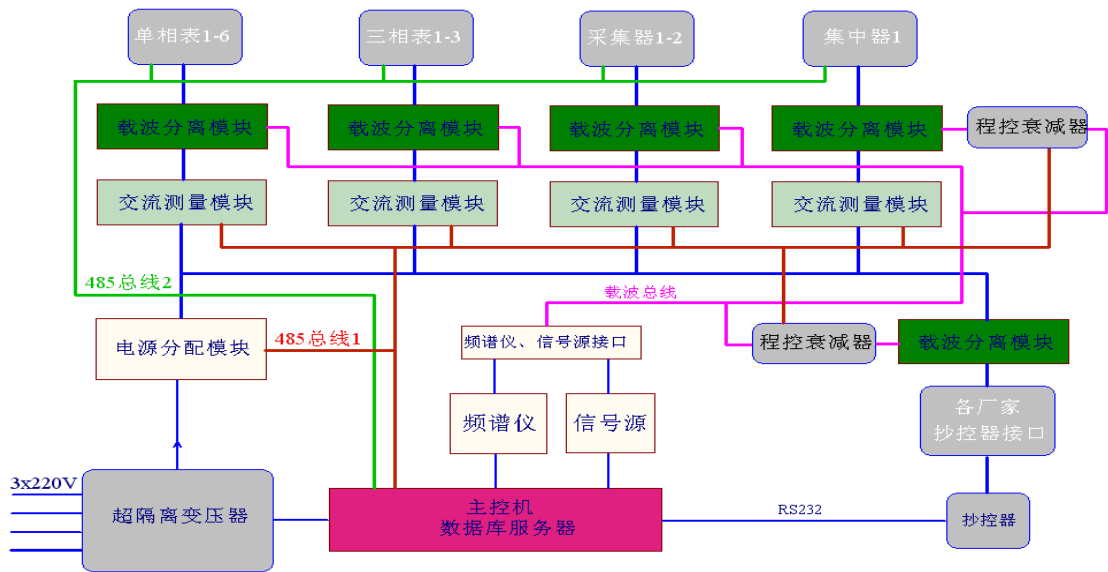


图 4.6 装置台架组成原理框图

装置台架是电力载波评估系统中测试评价电力载波计量自动化的所有设备，包括载波电能表、采集器、集中器等设备。装置台架和传统校表台不同的是，不仅可以挂装测试智能电能表，还可以挂装其他类型的计量自动化装置，但挂装的设备数量也没有校表台多。在进行装置台设计时，智能单相电能表按 5 表位进行预留设计、智能三相电能表按 3 表位进行预留设计，采集器按 1 表位进行预留设计，集中器按 1 表位进行预留设计。

台架左下侧，配置有一体化的工控机，台面设置键盘鼠标。台架下层安装电源、各模块和检测仪器。

4.3.2 测试主控平台

测试主控平台选用了一台工控机作进行计算和控制类的事务处理。整个测试平台的数据库管理，测试参数设置，系统权限管理都有这台工控机在后端处理控制。在测试主控平台上可以对各个虚拟的测量模块进行运行设置，使得测试开始后，电源分配模块、交流测量模块、程控衰减器和抄控器等都能自动按照预设的程序正常运行。测试进行过程中，测试主控平台能实时测量到载波信号的频谱和幅度和频谱并存储到工控机的数据库中，工控机会自动发起计算进程，同步计算出其他测试数据。

4.4 载波通讯系统试验与评价

4.4.1 电气参数测试

对三相智能电表、载波集中器的电气参数进行测试，分别在三个额定工作电压 U_n 、 $0.8U_n$ 和 $1.2U_n$ 上分别测量静态电流、静态功率因数、静态有功功率和静态无功功率；动态电流、动态功率因数、动态有功功率和动态无功功率；与国家标准规定的要求进行比对，得出被测设备的静态参数是否合格的结论；动态功率增量是否超标的结论。测试结果见下表。

表 4.1 电参数测试记录

工作电压	通信状态	静态有功功率 (W)		静态无功功率 (Var)		静态电流 (mA)		静态功率因数 (Q)	
		测量值	增量值	测量值	增量值	测量值	增量值	测量值	增量值
0.8Un	接收	1.91	-	12.55	-	18.40	-	0.15	-
	发射	2.41	1.5	9.52	-3.03	20.21	1.81	0.26	0.11
Un	接收	2.56	-	18.95	-	22.88	-	0.13	-
	发射	4.36	1.8	13.74	-5.21	24.56	1.68	0.26	0.13
1.2Un	接收	3.26	-	25.61	-	27.04	-	0.15	-
	发射	5.76	2.5	18.29	-7.32	30.31	3.27	0.29	0.14

电气参数测量模块采用市场采购的成熟模块，连接在电源与载波分离模块之间，能够测量被测设备的电流、电压功率、功率因数等电气参数，由于载波分离模块及载波滤波电路包含由电感电容，电感电容在交流回路中将影响功率因数和无功电流，电气参数测量的结果需要进行修正，从设备的电气参数测量结果中扣除，因此在上述测试条件下还增加了参数动态增量值^[42]。

4.4.2 载波通讯重要功能模块评价

（一）载波信号与交流电源的分离

电力载波信号，实际上就是中、长波段的电磁波，无线电测试的技术手段都是适用的。但是电力载波与电源线结合在一起，无法直接使用常规的无线电测量设备进行有效的测量，要实现精准的载波测量分析，必须使用有效的载波分离手段，将载波信号有效的与 220V 电源分离。

载波分离电路见图 4.1。

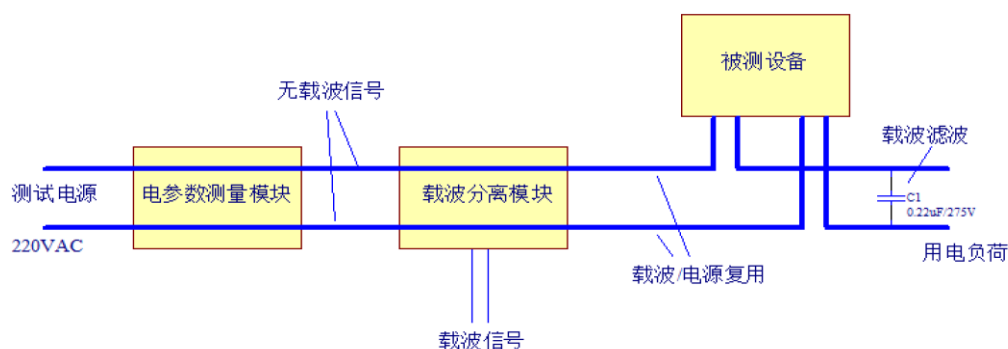


图 4.1 载波分离电路

模块化的载波分离电路，有效的将每个被测工位的载波与电源线分离，将测试台的电源与载波有效的分离，确保测试台上的 220V 电源线上不含有载波信号，不会形成载波泄漏而干扰测试结果。测试电源由专用的电源提供，可以输出满足测试需求的交流电源，载波分离电路将载波信号限制在被测电路一侧，该模块是一个三端口电路，左侧端口只有 220VAC 输入，无载波信号，右侧端口是载波信号与 220VAC 电源复用的端口。载波分离模块的性能将决定该测试系统的成败。由于载波信号会泄漏到测试设备的周围，一旦没有控制好泄漏，载波测试的结果将不可用，导致测试系统的结果不可用。

经测试，模块的载波信号分离与隔离能力在 60dB 以上，加上阻波电路后，组合分离度在 90dB，载波信号不会影响电参数的测量。

（二）载波通讯重要功能模块评价

1. 载波发射测试。

载波的发射幅度测量在载波分离模块的载波信号输出端进行测量，系统使用的是数字示波器，测量结果通过 USB 接口直接进入后台电脑，电脑经过修正后给出载波的发射幅度及 dBuV 的值。表 4.2 记录了载波发射测试的情况。

表 4.2 载波发射测试

载波方式	载波发射幅度(dBV)	载波中心频率(kHz)	频带宽度(kHz)	带外峰值(dBV)
扩频技术	10.0	120	30	-1.0
窄带调频	11.0	421	43	1250
OFDM	11.09	240-270	56	790

2. 载波接收测试。

智能电能表、载波集中器的接收性能实在 U_n 的工作电压下进行的测试。

智能电能表中采集器接收灵敏度测试是通过标定厂家的抄控器发射信号的电平，

将程控衰减器，衰减抄控器的信号指定到该电平进行抄表，然后统计主站抄表的成功率，从而得到智能电能表中采集器的接收灵敏度。

经过测试几种技术的接收灵敏度接近，由于电力线的噪声特性限制，接收灵敏度不能太高，提高灵敏度并不能改善信噪比，测试记录见表 4.3。

表 4.3 智能电表接收灵敏度测试

载波方式	载波发射幅度 (dBmV)	衰减量 (dB)	实际灵敏度 (uV)
扩频技术	73.25	-111.15	18
窄带调频	77.41	-110.88	30
OFDM	75.58	103.67	56

集中器接收灵敏度测试的方法是通过模拟主站软件发出问询信号，问询信号成功被接收受，在通过抄控器的模拟电表进行应答，两次握手成功即认为抄表成功，多次试验即可统计出集中器的抄表成功率，而不懂载波方式的下的抄表成功率也代表着不同载波方式下集中性接收信号的灵敏度。

经过测试得到集中器接收灵敏度结果为：集中器的载波模块体积尺寸稍大，电路优化，接收灵敏度略高，集中器接收灵敏度测试记录见表 4.4。

表 4.4 集中器接收灵敏度测试

载波方式	载波发射幅度 (dBmV)	衰减量 (dB)	实际灵敏度 (uV)
扩频技术	69.03	-108.5	15
窄带调频	82.09	-107.6	23
OFDM	75.58	-104	38

在图 4.2 中，在载波信号回路中串入程控信号衰减器，由测试电脑通过载波收发器向被测设备发送询问的信号，被测设备收到询问信号后会立即应答，收发器发射的信号电平由数字示波器记录。测试系统不断的调节载波衰减器的衰减量，直到被测设备不再应答时，通过读取衰减器的衰减值，再乘以载波收发器的发送信号强度就能得到被测设备的接收灵敏度值。

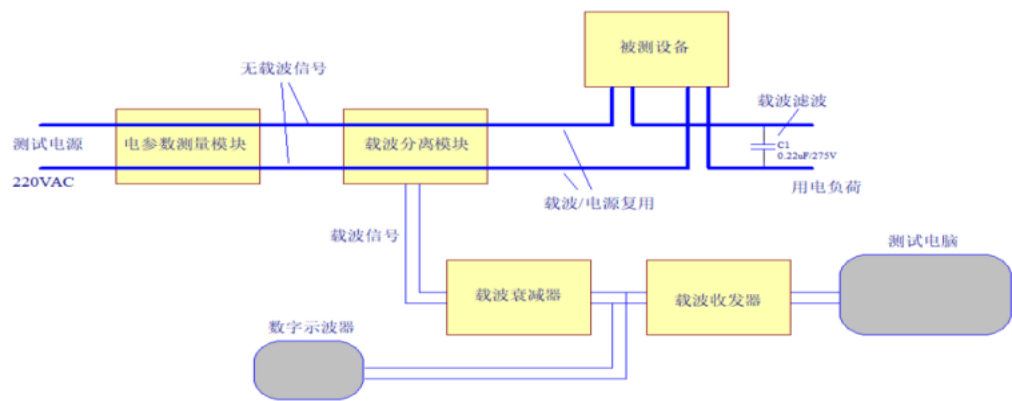


图 4.2 载波接收性能测试

表 4.5 记录了某次实验衰减器数据记录。

表 4.5 某次实验衰减器数据记录

载波方式	第一级 dB	第二级 dB	第三级 dB	第四级 dB	总衰减 dB
扩频技术	-30	-30	-30	-21.2	-111.2
窄带调频	-30	-30	-30	-21.0	-111.0
OFDM	-30	-30	-20	-23.5	103.5

3. 载波中继测试。

由于各通信厂家的中继方案作为版权保护，一般不开放给用户，中继功能的测试采用黑盒方式测试，在正常的抄表过程中认为阻断某一个通道，看系统能否完成抄表作业。这一功能对于电力用户具有特别的价值，这一功能测试的数据未能收集。

图 4.3 对载波中继性能测试原理进行了展示。正常情况下，测试电脑通过载波收发器发出的载波信号能够覆盖被测设备 1-6，通过调节载波衰减器-1 的衰减量，仅能确保被测设备-2 刚好能收到载波收发器的信号，调节载波衰减器-2，使被测设备-3 收不到载波收发器的信号，仅能收到被测设备-2 的载波信号，这样测试电脑发出的信号只能通过被测设备-2 的转发，才能传送到被测设备-3，同样，可以设置后续的载波衰减器 3-5，实现多级中继的功能测试，并测量评估中继的性能。

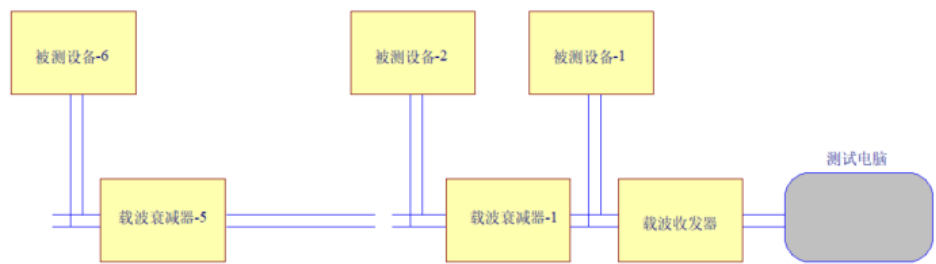


图 4.3 中继性能测试原理

4. 载波抗干扰测试

载波抗干扰测试的方法是通过智能电能表、载波采集器、载波集中器的通信通道施加干扰信号波形，然后通过抄通率来评价载波通信通道的抗干扰能力。

载波抗干扰测试的环境及步骤是：测试在正常工作电压下进行，采用了 PC 总线接口的波形发生卡，在工控机的软件支持下由软件合成并输出 TTL 电平的噪声信号，通过宽带功率放大器放大到足够的电平，再耦合到电力上，干扰信号从强开始逐渐减小，直到通信正常为止时记录临界的信号幅度，从而得出被测设备抗干扰的能力评价结论^[38]。

表 4.6 某集中器白噪声干扰试验数据记录

载波方式	第一级 dB	第二级 dB	第三级 dB	第四级 dB	总衰减 dB	信号幅度
集中器载波	-20.06	-17.26	0	0	-37.32	10dBV (2.15V)
信号幅度	-	-	-	-	-	27.3mV
白噪声幅度	-	-	-	-	-	1.83Vpp

该集中器采用扩频技术，在信号比噪声小很多的情况下还能正常接收，这是扩频通信的优势，在电力线场景应用取得较好的效果，而通常收音机的信噪比在 10dB 以上才能正常接收，而该载波模块的信噪比仅为 1.4dB。

5. 阻抗适应性评价。

电力阻抗，工频下的阻抗变化对于通信的影响是明显的，但系统仍以载波频段的阻抗作为研究和解决的对象，测试和模拟都基于载波频段的阻抗。

电网的动态阻抗是影响载波发射的另一重要技术指标。低压电力的动态阻抗变化很大，如电网轻载时段，负载电阻较大，约为 120-300 欧，相当于平行传输线的阻抗。在电网负载较重时，阻抗会变得很小，近似于短路，如电网负载电流 100A，等效阻抗就只有 $220V/100A=2.2\Omega$ 。

100A 电流对于低压电网来说是常态，也就 22kW-40kW，几个家庭的用电量而已，电力载波的收发在低阻环境下使用将是常态。载波发射电路如何适应电网的阻抗波动，在阻抗大动态下能保证载波发送具有足够的电平是对系统应用的挑战。

电力不是专用的通信网络，始终存在工频电流，因此，阻抗测量只能采用间接的方法，以两端口模型进行测量，阻抗测量原理见图 4.4。

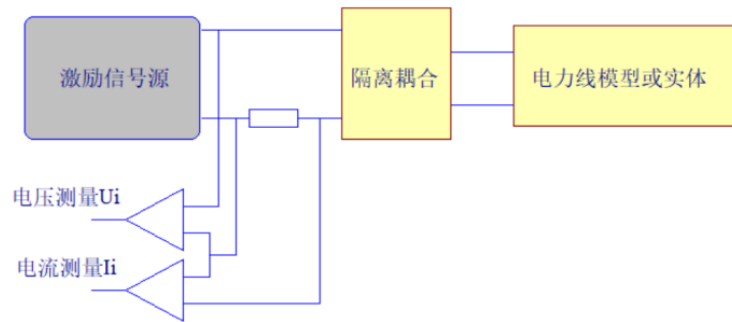


图 4.4 电力阻抗测量

激励信号源向电力模型或实体发送载波频段的激励信号，发送的是交流信号，送出激励电压 U_i ，测量激励电流 I_i ，即可计算出电力的阻抗 $Z_0=U_i/I_i$ ，得到的 Z_0 也是交流阻抗，包含实阻抗和复阻抗，改变激励源的频率，可得不同频率对应的阻抗。

4.5 本章小结

本章节通过对电力行业载波应用设备的综合检测装置的研制，分别研究并制备了各项指标检测的方法和组件，还系统的阐述了载波应用中载波的性能指标的检测手段和考核方法。

在研制了综合评价电力系统载波产品的检测装置和相应的测试软件上，对载波通讯系统技术指标的合规性进行了动态的测试和综合评价，为基于电力线载波通讯的电力营销计量自动化应用提供了技术保障。

第五章 计量自动化在区域电力营销中的应用分析

5.1 引言

昆明地区计量自动化系统启动并全面投入运行以来,配电网受益于计量自动化管理系统的自动测量,季度、年度统计分析和精细化配电线路管理,解决了线路管理问题。电力营销计量自动化系统不仅能够实施监测用电现场的用电情况,还能够采集用电现场低压电网侧线路和低压台区的实际用电数据,通过对这些实际计量数据的实时监测和检查,可以快速准确的对用电现场线损数据进行监控,及时从 CT 倍率、户变关系、偷漏电情况等方面查找线损异常的原因,解决线损异常存在的问题。同时,通过计量自动化系统进行线损定量分析后采取补偿措施,不但能够解决线损异常的问题,还能有效降低配网的管理线损。另外,因为有了系统准确实时的现场用电情况数据,合理准确的计算线路供电半径、监控设备运行功耗,监测变压器容量和负载的均衡情况变得快速简单,进而为电网络建设优化升级提供了可靠的数据支撑,为降低技术线损指明了方向。

停电管理方面,停电事件的自动采集,停电数据的分析利用都为电力营销服务提质增效提供了准确的数据基础。

5.2 线损管理及应用评估

5.2.1 线损“四分”管理

10kV 及以下同期线损管理系统的开发是针对管理线损开发的一套功能系统,其基础档案来源于营销系统,电量数据来源于计量系统,可对线路线损和台区线损按天进行计算分析,对线路台区异常原因精准定位,明晰问题路径和处理方法,实现管理线损统计分析、异常处理的闭环管控信息化、智能化,指导运维人员完成线损异常问题的处理。

2021 年起计量自动化系统作为管理线损源头数据系统,承担着管理线损基础采集数据传输和计量基础信息档案核查的主要职责,10kV 及以下同期线损管理系统具体负责异常原因分析、指标统计计算、工单闭环管控和报表定期统计的功能。线损计算率及合格率仍属于计量自动化实用化功能应用考核范畴,对应指标取自 10kV 及以下同期线损管理系统,本部分主要介绍影响线损计算率和线损合格率的主要原因及处理

办法。

（一）配网线损管理

线损是指电流在电网线路传输过程中由于电阻造成的电能量的损失。一般来说，配网线损可以分为技术类线损和管理类线损两种。电网运营中，各级供电部门电力营销管理的重要技术指标就是线损率。因为通过线损率能够看出配电网网络结构是否合力，配电网运行是否科学，电网运营的经济效益和管理水平。电力营销计量自动化系统为配网线损的计算、统计和分析提供了准确可靠的数据基础和管理依据。

电力营销计量自动化系统搭建于电力营销服务器上，强大的算力能够对智能电表上报回的用电现场数据进行多维度的计算统计，数据来源丰富，数据视图全面，分析视角多元，为线损监测、线损分析、线损降低打下来坚实的数据基础。电力营销计量自动化系统，不仅大大提升了配电网中用电情况数据信息采集的效率，提高了电力营销线损管理专业数字化、信息化和自动化的水平，同时还节约了大量的人力、财力和物力，一次投入，长期适用。电力营销计量自动化系统依托高数据采集，服务器端高速准确的算力，为线损异常原因定位，节能降损措施制定提供了科学可靠的数据支撑依据。

1. 电力营销配网线损通常采用“四分”管理，即分压、分区、分线和分台区对配电网线损进行分别管理，“四分”数据综合后实现配电网线损的综合管理。

配网营销线损“四分”管理，采用分而治之的管理思路，不但能够将线损管理指标进行分解，还可以将具体指标落实到配电网中的各个考核点上，定位清晰，措施有效地节约电能损耗，实现电力营销管理精细化、科学化。

（二）依托计量自动化系统的线损管理

在电力营销线损管理中，计量自动化系统主要从线损模型的建立和线损计算，线损“四分”数据的自动化统计方面发挥了巨大的作用，具体应用如下：

1. 在过去的电力营销线损管理工作中，考核点的电能量数据抄读收集都是通过抄表工现场抄录取得，消耗了大量的人力和时间，还造成了抄录的数据准确性差，实时性更加谈不上，计算出的线损更是无法成为管理依据，电力营销线损管理只能说是进行了考核点的数据采集和线损计算，准确性无从考证。当昆明供电局计量自动化系统建设完成后自动的数据采集、计算存储成为了可能，准确实时的电能数据也唾手可得。计量自动化系统上线时，需要按照“四分”管理要求绘制各级网络拓扑图，并标记

考核点，在配网图绘制过程中，不仅排查发现了配网关系中的异常网络，还对用电客户考核点档案，考核管理进行了细致全面的梳理校对。网络拓扑图绘制完成后，对各个考核点设置了线损考核模型，通过多轮采集试算校验网络拓扑的正确性和计量自动化系统数据采集的准确性。

2. 昆明供电局计量自动化管理系统提供了考核点档案导入的功能，对于系统中存在的考核点可以设置不同的“四分”管理模式，还可以根据管理指标要求设置各种模式下的线损指标范围。设置好考核点后，就可以对各个考核点的电能量数据进行查询、采集、计算和分析，从而全面及时的掌握配电网考核点间的线损情况，快速准确定位异常部位，有针对性的解决线损异常问题，有方法性的从根源上降低线损。计量自动化系统根据考核模型计算出考核结果，还可通过图形化，报表化的方式进行数据结果展示，即提高了分析预测的能力，还大大提高了工作效率。

5.2.2 线损计算模型及计量装置检查关键点

（一）线损计算模型

配电网线损率计算方法是：线损率 = (供电量 - 售电量) / 供电量

因为配电网中各个线损考核点的计量装置均是电能表和互感器，所以考核点计量装置的稳定运行便成为线损率统计正确性的关键因素。因此在降低线损率是，计量装置计量准确性的维护检查就是关键抓手。另外对偷漏点行为的用电检查，计量装置计量的升级改造也对线损率降低有着很好的效果。

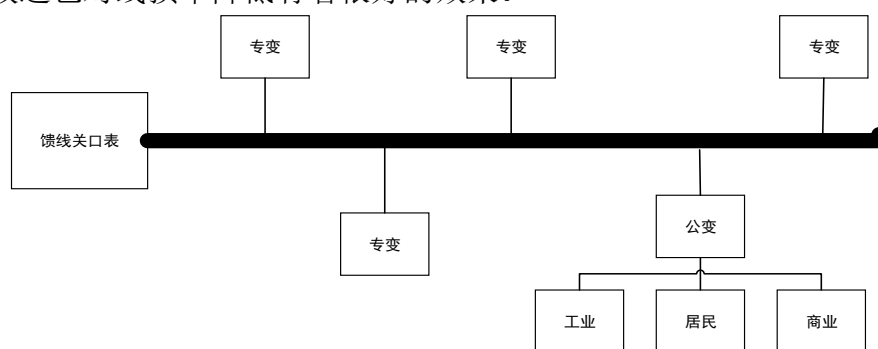


图 5.1 10kV 配网拓扑简图

从图 5.1 10kV 配网拓扑简图可以看出，馈线关口表处计量的是供电量，下挂的各个转变公变处计量的是售电量，当各个关口处考核点的计量装置准确有效，那么我们可以知道，这条 10kV 馈线线路的管理线损可以记为零，供电量减去售电量的差与供电量的比值即为这条供电线路的技术线损。以此类推，配电网络中，只要各个考核点

的计量装置稳定运行，计量结果准确有效，那么因为计量引起的线损异常问题将得到有效解决。换句话说，只要配网线路中各个考核点计量装置计量准确的话，抛开管理线损，技术线损的测量都将得到保证。

综上所述，一方面通过计量装置的周期性检查检修，降低计量装置运行故障率，提高计量装置计量准确率，两方面加强营销稽查和用电检查，通过内稽外查消除偷漏电是降低配电网线损率，消除配电网异常故障，提升配电网运营效益的有效方法。

1. 自电力营销计量自动化系统上线以来，昆明供电局每年底制定上报次年的年度用电检查计划和年度专项工作计划，次年，电力营销部依据批准的周期性检查计划和专项组织开展周期性用电检查和反偷查漏专项工作，同时根据具体环境和管理要求，还会将安全保障巡查与用电检查相结合，开展各种上级下达的专题检查整改工作。经过几年的运行，不仅有效降低了线损率，线损异常率也明显下降，挽回经济损失的同时，提高了电网运营的经济效益，提升了电网在社会供电保障方面的美誉度。回顾总结计量自动化系统上线后线损管理经验得出，通过线损“四分”管理报表中线损率波动情况可以发现定位线损发生异常的区域，通过现场踏勘对异常区域的线路、台区进行检查，充分结合异常区域中各个考核点计量装置上报的电流、电压、负荷曲线等信息，排查出异常考核点及异常原因。通常，异常多发生于管理线损方面，常见的情况有异常区域出现了转供电情况，异常区域的线变关系、户变关系设置错误，或考核点位置设置错误，用电客户已完成业扩档案建立并装表用电，但在计量自动化系统中未标记用户售电量计量考核点等。这些情况都可以通过电力营销系统其他功能模块间的数据关系建立解决。

（二）计量装置检查重点

专变考核点的检查重点一是监测其运行过程中电压与电流的不平衡情况，及时发现失流、失压现象；二是核算检查智能电表行度量是否与用电现场计量点的智能电表记录一致，当二者之间的偏差大于 15%时就要进行估抄、漏抄等问题的排查；三是通过现场外观检查，对存在故障的可能情况进行摸排，例如观察外观是否有破损、发热等，四是检查考核点的接线关系是否正确。

公变考核点的检查重点是以下四点：

1. 检查现场的行度与系统的是否一致；
2. 计量装置外观检查是否存在故障（如外观是否破损，发热等）；
3. 检查接线是否正确、C T 变比是否匹配；

4. 配变监测计量终端的C T变比与系统是否一致。

关口表考核点检查主要从用电现场计量行都与电力营销系统中数据的一致性和现场关口表考核点计量装置的工作日志着手重点检查。

5.2.3 电力营销系统中线损合格率异常分析处理

影响线损合格率的原因分为两个大类，分别为管理线损和技术线损，本部分仅对其中的管理线损类的问题进行分析解答。影响台区线损和线路线损的原因类似，主要有基础档案错误、计量装置接线错误、抄表异常三类原因，此处以影响台区线损合格率的原因举例说明。

（一）基础档案类异常问题

1. 倍率档案错误

问题描述：因倍率维护错误，导致某些计量点在计算电量时，较正常值偏大或偏小。解决办法：该类问题需要现场核实计量装置的正确倍率参数，然后在营销系统进行更正。

2. 台区户变关系错误

问题描述：目前线变关系错误的问题已很少发生，但台区户变关系错误问题仍较为突出，台区户变关系错误一般会同时影响两个台区或多个台区的线损计算结果，特别是下行通信方式选用微功率无线、双模、485 通信方式的台区较为常见，另有少部分窄带载波台区因存在与相邻台区共地或共零的情况导致串抄。

解决办法：该类问题需要根据系统提示完成现场核实，再重新调整营销系统内的错误户变关系。

3. 总表档案维护错误

问题描述：因台区总表档案维护错误，同一个台区维护了多只总表，导致供入电量被重复累加，线损异常偏大。

解决办法：核实现场实际的供入计量点情况，更正营销系统错误档案。案例：如下台区，系统监测到存在多只总表，导致线损率异常偏大。

4. 台区未维护低压居民用户

问题描述：台区线损率为 100%或台区线损率异常，不能查询到客户（台区考核户、公变低压用户）的档案或计量点档案信息，判断为台区用电客户基础档案缺失异常。

解决办法：一般为营销台区档案维护错误，核实详细情况后更正营销系统错误档案。

5. 台区内有低压表计测量点号重复

问题描述：台区下存在电能表资产编号不一致但测量点号相同的，判断为测量点号重复，导致测量点号重复的表计抄表异常，线损异常偏大。

解决办法：一般为营销台区档案维护错误，核实详细情况后更正营销系统错误档案。

（二）装置类异常问题

问题描述：常见的计量装置接线异常问题有失压、失流、电流反极性，以上三类问题对线损合格率的影响较大，一般会导致负线损。

解决办法：可根据系统提示到现场分析处理。

（三）抄表类异常问题

1. 抄表失败

问题描述：因部分计量点抄表失败，导致供出电量少计，线损率异常偏大。解决办法：参照抄表异常问题的判断与处理。

2. 抄表结果与实际值不一致

问题描述：因目前导致抄读结果与实际值不一致的问题主要有三类：一是表计故障计量失准；二是终端上报的报文异常，上报值与记录值不一致；三是终端采用实时转冻结方式抄表，主要出现在使用窄带载波通信方式的低压台区，采用实时转冻结模式后因抄表速度较慢，大部分表计回数较晚，与真实的 0 点表码差距较大，导致线损异常。

解决办法：前两类需要现场检查终端和表计的运行情况，更换故障设备。第三类问题建议将窄带载波模块更换为其他抄表速率较快的抄表方式，一般更换为宽带载波，保证表计在 0 点后短时间内抄读完成。

5.2.4 基于计量自动化的线损管理应用研究

（一）配变计量自动化对中低压线损的有效管控评估

自电力营销计量自动化系统在昆明地区上线运行以来，该部门区域内的配电网全面采用自动化计量系统，根据线路拓扑关系计算“四分”线损，为降低管理线损发挥了相当大的作用，更好地指导了节能降耗工作，通过补偿措施，消除线损异常，大幅降

低配电网的管理线损。

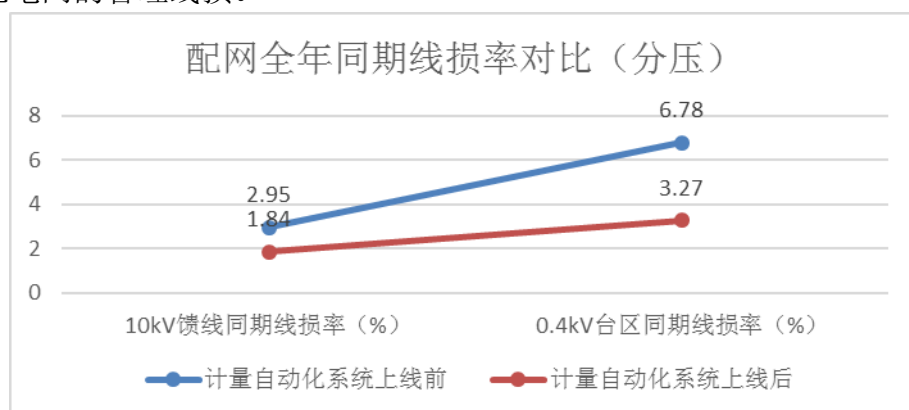


图 5.2 10kV 配网全年同期线损率对比（分压）

从图 5.2 中可以看出，自电力营销计量自动化系统上线运行后，以 10kV 馈线和 0.4kV 低压台区为例，全年的同期线损率相较于电力营销计量自动化系统上线前均有下降，同时全网同期线损率也有所下降，整体应用效果明显。

经统计，自电力营销计量自动化系统上线运行后，馈线线路总数增加了 41 条，但异常线路总却减少了 4 条，馈线线损异常率随着馈线数量的增加反而降低；台区总个数增加了 241 个，但台区异常线损率从 8.18% 减少到 5.90%。

（二）计量自动化降低管理线损

用电现场的实时用电情况可以通过电力营销计量自动化系统进行监测，及时发现用户用电异常或偷窃电、漏电的问题，从而及时做好相关用电整治，追补用户电量损失，为供电部门挽回经济损失。

昆明供电局电力营销配网管理人员在利用电力营销计量自动化系统对用电客户的现场用电情况进行实时监测时，发现户名为“XX 生产有限公司”的计量点中，智能电表实时的 A 相电流为零，且一直保持。随后配网管理人员计量管理人员协同负控终端厂家第一时间前往用电现场进行踏勘检查。现场对该计量点智能电表的在线校准和接线方式进行了检查，对互感器和二次电流值进行了监测，对负控终端运行故障日志进行了分析排查，最后确认智能电表 A 相实时电流为零的原因是负控终端出现了故障，并及时对负控终端进行了更换，解决了智能电表 A 相实时电流为零的问题。

由于该用户的负控终端出现故障，导致供电公司实际收取的电量过低，需要对该用户进行补电，补偿功率损失。根据计量自动化系统对该用户的用电量数据采集值，并通过计量故障电量恢复修正计算方法，计算得出该用户应恢复的电量为 98567 千瓦时，由电力营销收费人员在电力营销系统中完成电费补收操作。

本案例通过应用计量自动化系统，对用电客户的用电情况进行监控，通过负载控制终端进行用电监测，不到现场即可实时发现用电现场用电异常的问题，监测到的用电数据为用电检查工作的开展提供了依据，不仅有效减少用电损失，还为用户用电保障服务提供可靠的数据支撑。

昆明供电局电力营销用电检查人员使用电力营销计量自动化系统对工业用电户计量点用电量抄回监测时发现，该用户计量装置二次侧 A 相电流为 5.13A，C 相电流为 2.78A，根据高供低计一次电流到二次电流的换算方法计算出 A 相的一次电流为 511A，与实际 A 相监测到的一次电流（519A）基本符合，而计算出的 C 相的一次电流为 273A，与实际 C 相监测到的一次电流（492A）差距较大，初步判定该用户存在窃电或漏电的用电异常。

电力营销用电检查人员在获得批准后到达异常用电现场，依照现场工作手册确保安全后对计量装置的二次接线处进行检查，这是发现电流互感器的 K2 接线端没有拧紧，并且二次线是用普通胶带捆绑起来的，打开胶带，可以看到二次接线的转角处被剥开并接入了一条 2.5cm^2 的线。然后沿着被剥开的线继续检查，大约在距离剥开点 15 厘米的位置，电压互感器的二次线同样也是被剥开接驳了一条 2.5cm^2 线。在计量柜外一条低压电缆线接驳着电流互感器和电压互感器上的两根跳出的导线，最终该低压电缆线顺埋至一个房间，通向该房间内的用电装置。当该用户启动该房间的用电装置时，C 相电流就被分流到了该用电装置上，而流经智能电能表的 C 相电流就会较少，这种窃电手段通过接驳分线和加装用电装置来影响智能电能表的正常计量，最终达到窃电，少交电费的目的。这种手段不但对配电网络的稳定运行造成了影响，在窃电用电现场简陋的线路接驳存在着极大的安全隐患。

用电检查人员现场核实清楚后，第一时间通知了警方，随后按照窃电管理的有关规定，向该用电户追补了 8.34 万千瓦时的电量，追罚了 18.76 万元的电费。

此案例说明了电力营销计量自动化系统在反偷查漏工作中发挥的重要作用。

（三）计量自动化对中低压电网运行状况的有效管控评估

2016 年发现昆明某变电站 10kV 馈线的线损率连续几个月居高不下。电力营销工作人员首先对该馈线上各个计量点的售电数据之和和考核点的电量数据之和进行了比较，发现某新建小区的计量点售电数据没有经过计量自动化系统接入到考核点计量上，馈线考核点计量售电量时遗漏了该小区的电量，从而造成线损率居高不下，该线损率为管理线损率。后来将该小区的计量点售电数据通过计量自动化系统接入到考核

点计量后该馈线线损率虽有所下降，但仍然维持在 8% 以上，急需进一步对该馈线线损率异常的原因进行排查。

在排查过程中，首先发现该馈线 A 台区的配变监测计量终端，因在各个时段的读数都不同，所以抄表准确性收到了影响。然后在 B 台区中发现电流互感器一次侧的电流方向相反错误。最后，对 C 台区内一电流互感器进行在线监测时发现 C 相无电流流过，现场检查发现该电流互感器未进行 C 相电流计量。以上三点都是造成该馈线线损率无法降低的原因。

在排查出以上线损率异常异常原因后，电力营销人员对上述问题进行了逐项整改验证。整改完成后该馈线的线损率随即进入到正常范围，并且此后几个月通过计量自动化系统监测，该线路线损率未再发生异常。

通过以上案例说明，电力营销计量自动化系统通过进行用电现场数据实时采集并和售电系统数据比对，能够及时监测到用电现场的异常情况，通过现场检查能够及时发现线损异常的原因，有针对性的制定措施，有效降低线损异常率，提高配电网运行可靠性。

5.3 停电管理及应用

5.3.1 停电事件分析及采集的原理

停电是企业一项重要的管理运营工作，传统的人工统计方法往往无法对停电事件进行快速、准确的统计。自动化计量系统及其目前的功能、发展，越来越多地体现在管理营销的需要，以满足停电事件的需要。利用电力营销计量自动化系统对各类终端数据进行采集，可以快速、高效的实现计量终端和主站服务器之间的通信及数据采集。在停电管理业务中，智能电表通过自动记录停电事件的日志，实现了停电事件数据信息的存储和追溯，进而提高停电管理的自动化和信息化水平，提高电力营销服务能力为电网企业赢得良好的社会美誉度。

电力营销计量自动化系统的上线运行为停电事件的记录、采集和分析提供了技术平台。配变终端和负控终端的停复电时间通过计量自动化系统记录；对于用电客户的停电类型、停电原因、停电时间、复电时间也能够通过计量自动化系统进行记录，分析、统计和保存；当用电客户的信号薄弱或计量终端断电时，停电事件相关信息的采集会受到影响，但计量自动化系统会通过计量终端断电前的日志信息和配电网的运行

信息进行逻辑分析，比对判断后推导出计量终端断电期间发生的电网停电信息。

5.3.2 停电事件采集的实现方法

用电客户停电事件信息的采集主要依靠电力营销计量自动化系统实现。电力营销停电管理功能自动记录、分析、统计和存储由计量终端通过计量自动化系统上报的停电信息，包括停电开始时间、停电结束时间、停电原因、停电类型等。

除前面提到的停电事件记录，停电数据存储以外，利用停电事件信息还能够辅助进行用电客户用电情况异常的智能检测，同时计量自动化系统能够将检测出的异常告警信息向用电计量终端和电力营销系统进行分发。用电计量终端收到并记录的自动告警内容包括有用电异常的类型，用电异常发生的时间、用电异常发生时智能电表的有效电量，用电现场其他实时的用电数据（例如有功功率、无功功率、三相电压、三相电流等）等。计量自动化系统与计量终端间的通信正常，为用电现场停电事件信息的采集提供了通信通道。下面分别从计量终端有停电事件上报和无停电事件上报两种情况来说明计量自动化系统在停电管理业务中是如何应用的。

（一）计量终端有停电事件上报

停电事件包括用电现场的开闸断电事件和合闸复电时间。

一般情况下，当电力营销计量自动化系统和计量终端工作正常时，计量自动化系统能够及时准确的采集到计量终端的停电事件信息，并将该信息进行计算、分析，把得到的结果与停电事件原始信息一同进行存储。计量终端采集的停电事件原始信息包括计量终端停止记录用电量的时间、计量终端的断电时间、计量终端通电开机时间、计量终端当日累积的停电事件等。另外要求计量终端每运行 15 分钟冻结存储一次云端的电流、电压等运行情况数据，主要用户计量终端断电后发生停电时对停电事件信息的分析推导。

为了避免医院、学校等重要场所计量终端的供电电源断电，通常要为计量终端的供电电源设置双回路供电，其中主电源为配电网供给的交流电，备用电源为计量终端配备的可充电电池。当重要场所计量终端的主电源断电时，备用电源可以继续给计量终端供电，满足计量终端与计量自动化系统之间的数据传输与信息交换需要。

自电力营销计量自动化系统上线运行后，昆明供电局逐步将客户停电事件统计作为辖区范围各下级供电机构年度绩效考核指标。刚开始对停电事件进行统计管理时，采用了计量自动化自动采集与人工记录采集双轨运行的方式，发现计量自动化系统采

集的停电事件数据与人工记录的停电事件差距很大。进过对计量自动化系统采集到的停电数据进行抽查、分析发现，有部分计量点并没有发生停电但计量终端却上报了停电事件信息，还有一部分计量点的计量终端总是在凌晨固定的时间发生自动断电。于是电力营销管理人员联系了计量终端厂家，一同到用电现场对发现异常的计量终端进行检测，最终摸排出 53 台有故障的计量终端。10 个工作日后，计量终端厂家完成了故障终端的更换，此后计量自动化系统采集的停电事件信息与童工录入的停电事件信息差距减小，运行半年后，两者数据趋于一致。

这个案例说明，由于长期服役、未检修、未校准或者运行环境恶劣等原因，导致一部分计量终端出现了故障或者缺陷，带来的直接影响就是该故障计量终端采集数据的准确性和有效性得不到保证，客户停电事件信息出现误报、错报、不报的情况，因此需要建立一套二次控制机制（例如人工抽查复核），发现计量终端故障，识别存在问题，过滤无效信息，提高计量自动化系统采集数据的质量，提升电力营销综合管理水平。

（二）计量终端无停电事件上报

当计量终端无停电事件上报时，我们首先通过计量自动化系统采集计量终端用电情况数据，通过是否有电量记录进行计量终端是否有功能缺陷或硬件故障的初步判断，然后再与人工记录的停电事件信息进行对比即可推导出停电事件信息，具体推导判断方法如下：

1. 当采集到的三相电压均小于额定电压的 60%，同时三相电流也小于启动电流，则可以判断该计量点发生了停电事件；
2. 用电现场计量装无故障、异常告警事件上报，但该计量点的用电情况数据大幅减少，则可以判定为该计量点发生了停电事件；
3. 当采集到的一相电压不小于正常工作电压的 60%，则可以判断该计量点发生了复电事件
4. 用电现场计量装无故障、异常告警事件上报，但该计量点的用电情况数据大幅减少一段时间后又回复正常，可以判定为该计量点发生了复电事件；
5. 根据馈线出线开关或分断开关是否停电，可以直接判断开关后所挂各个计量点的停复电状态。同理可得，通过变压器的停复电状态，或者低压线路开关的闭合状态也能够判断出台区下挂载各个的计量点的停复电状态。

综上所述，在深入理解计量自动化系统停电逻辑判断的基础上，形成停电事件逻

辑判定流程图，见图 5.3。

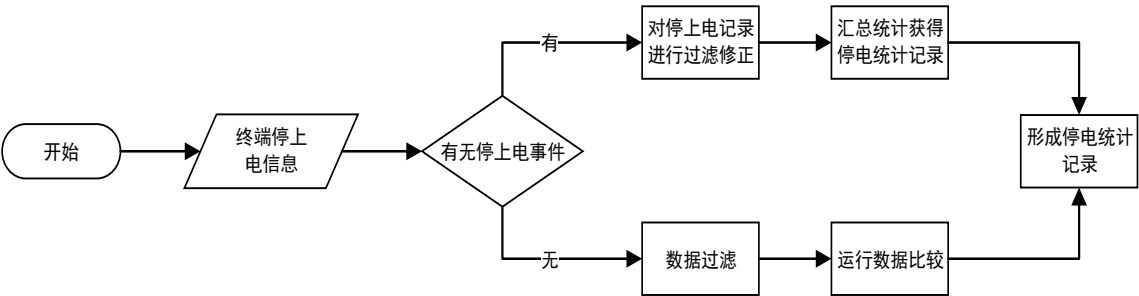


图 5.3 停电事件逻辑判定流程图

5.3.3 基于计量自动化的电力营销停电管理

在电力营销计量自动化系统上线运行之前，昆明供电采用的是由电力营销人员将从调度系统获得的停电数据、停电检修现场带会的停电数据、生产技术部门采集到数据手工录入到电力营销系统中，再通过营销系统的统计分析功能来对停电事件进行管理。停电事件信息的时效性无从说起，更不用说对停电事件进行管理，提升电力营销服务水平。随着配电网用电客户的飞速增加，传统手工录入停电信息造成停电管理流于形式的问题日益凸显，用电客户对配电网保供电能力的质疑声也愈发变大。

电力营销计量自动化系统上线后，不仅突破了停电信息采集时效性和准确的瓶颈，统计汇总功能在后台自动完成，为电力营销停电管理业务提供了科学的数据支撑提高了营销系统停电管理的准确性，提高了电力调度的科学性，提升了供电局营销服务的质量和水平。

显示工作中，计量自动化系统采集到的停电事件信息会上传至电力营销信息系统中，自动与人工录入的停电事件信息进行比对，形成停电事件异常数据差异表，电力营销人员对停电事件异常数据差异表中的记录逐条核实后，方可得出准确的停电信息。

通常有三种情况会导致停电事件的数据信息进入到异常数据差异表中。一是由于通信过程中的干扰，或者计量终端本身的故障，或者计量终端供电电源断电等问题，导致计量终端停机且没有完整的采集到停电事件信息，造成计量自动化系统中的停电事件信息缺漏；二是当电力营销系统中没有该停电事件信息，但是计量自动化系统中采集到了该计量终端上报的该时点的停电事件信息，那么这条数据信息也会进入到异常数据差异表中，需要有电力营销工作人员进行工作记录进行比对核查，方能查明异常原因、判断计量终端是否有误报；三是两个系统中同一时段的停电事件信息无法匹

配,造成的原因主要是停电事件信息的匹配字段有些许出入,例如停电开始时间的时分秒。无法匹配的停电事件信息也会进入异常数据差异表,需要电力营销人员分析判断后手动进行匹配处理。

2016年7—12月昆明供电局对某地区配电网的停电事件跟踪和分析,得到停电时间信息采集准确率变化情况,详见图5.4。

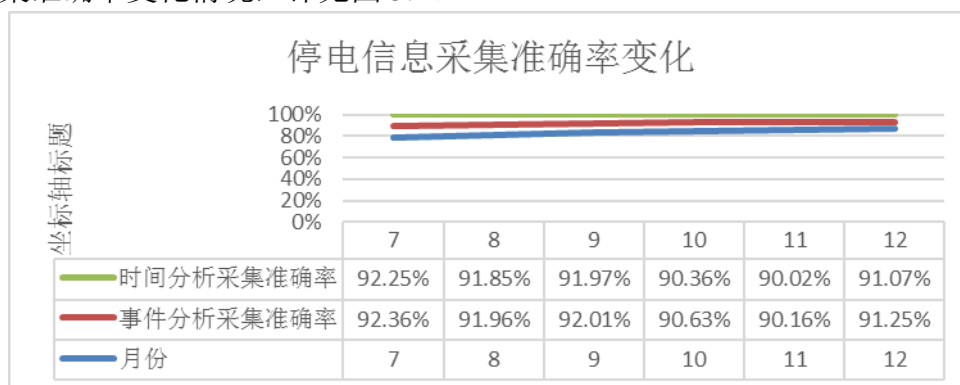


图 5.4 停电信息采集准确率变化

从图 5.3 中可以看出,2016 年 7-12 月昆明供电局对某地区配电网的停电事件采集准确率均在 90% 以上,计量自动化自动采集计量装置上报的停电事件信息,后台比对进程会将其与电力营销工作人员录入到上位电力营销系统中的停电事件信息进行差异化核对处理,提升停电事件采集准确率的同时,还提升了电力营销停电管理的业务能力。进入秋冬季,随着配电网小区用电取暖的高负荷用电现实,和无线电干扰情况,导致计量终端故障增多,断电或数据采集错误率增加,形成了在合理范围内的采集准确率下降。

5.4 本章小结

电力营销计量自动化系统集成电能监测技术、计算科学技术、数字通信技术。通过多配电网中的计量终端、智能电表实现了用电现场用电数据的实时采集。对采集到信息进行计算分析后,可以为现场用电监测报警,用电质量监测等方面提供科学准确的数据基础。

本章从昆明供电局电力营销计量自动化系统在用电检查和停电管理业务方面的应用案例出发,对计量自动化系统在反偷查漏和电力营销综合管理能力提升方面的作用进行了研究和分析。在电力营销线损“四分”管理中,通过配电网拓扑图的绘制和维护,可以准确地建立校对各个考核点的线损计算模型,通过对计算结果的关联分析,

实现从线损率计算到线损率和故障率降低的能力提升。在发现线损率异常时，结合现场用电检查，在反偷查漏、违约用电、违法用电的查证方面也取得了很好的效果，跨专业实践应用不仅发现了存在的窃电问题，还追回了损失电量，追罚了电费，挽回了经济损失。应用效果启发鼓舞人心。

电力营销计量自动化系统能够自动采集各个计量终端的停电事件信息和告警信息，通过和上位电力营销系统人工录入的停电事件信息进行比对，在由人工将比对出的停电事件信息差异表进行核实，有效的提高了停电事件采集的准确率。与传统的人工录入停电事件信息、再通过电力营销系统的统计查询功能对停电事件信息进行分析相比，电力营销计量自动化系统在停电事件信息采集方法，停电事件数据采集准确性、完整性，停电事件相关数据计算效率和电力营销停电管理自动化信息化管理方面的提升都十分明显。

第六章 结论和展望

本文首先对通信系统的组成、信道、数字通信系统和信息传输方式进行了阐述。由于低压电力线不是专门的通信线路，它还承担着电能量输送供应的任务，为了能更好的利用低压电力线进行载波通信，了解电力电力线的信道特性变得尤为重要。通过文献的查阅及学习知道，电力线载波信道输入阻抗与信号传输频率正相关，各种噪声叠加后会加到电力线通道上，电力线载波通信信号的衰减与通信传输距离和信号频率有关。了解到这些传输特性后，我们采用了 M.Zimmermann 与 Klaus Dostert 的自顶向下建模法，并结合 Middleton A 类噪声模型进行随机脉冲噪声的模拟，建立了低压宽带电力载波信道模型为后续通信仿真提供支撑。就低压宽带电力线载波通信系统物理层的调制解调过程进行了分析。依据 GB/T18657.3—2002 规定的三层模型对通信帧格式、传输规则和链路层进行了定义。最后从低压配电网复杂环境中的功耗优化和远距离宽带载波传输优化方面进行分析论述并提出优化方案。通过上述对载波芯片和模块电路进行优化后，试验得出载波芯片的静态电流可控制 20mA，相比于未优化的宽带载波芯片，功耗节省超过 30%。

然后从能源互联网全面建设对智能电表的新需求出发，从智能电表的电能计量、测量及监测、事件记录、阶梯电价设置、冻结功能、负荷记录、电表清零、信号输出、费用控制等九个方面的需求进行分析梳理。然后依据 IR46 标准的双芯电能表主控关键技术及核心指标，使用模块化思想，进行了三相智能电表的设计与验证。

设计出的智能电表静态功耗低于 0.5W，实现了低功耗的控制。管理模块指标是 CPU 正常运行的负荷率小于 15%，内存占有率小于 25%，管理模块系统的资源占用留有充足的裕量，为多模块智能电表的应用扩展提供了额外的硬件资源。计量模块以计量精度和时钟精度作为性能评估指标，计量精度 $< \pm 0.1\%$ ，满足 0.2 级电表的要求，计量模块可以对高次谐波进行分析，最高可达 41 次谐波；为满足负荷辨识等应用，计量模块的原始波形输出能力也是测试的重点，经试验测得，计量模块的波形输出在 34 点 / 周到 126 点 / 周波之间，满足负荷辨识等扩展应用的要求。辨识模块主要是实现居民用户的用电负荷辨识，辨识精度是模块片辨识能力的主要衡量指标，测试中平均辨识精度大于 87%。应用通信成功率衡量负控模块的上传下达能力，实验中负控模块通信成功率高达 100%。

智能电能表设计了计量、管理、计算和负控四个模块，四个模块如乐高积木一般，

可根据实际应用需求进行组合拼插使用。其中管理模块和计量模块是智能电表的标准功能模块，实现了智能电表计量的基本功能，根据应用场景的需求，计算模块和负控模块可作为选择配置。当智能电表投运后，发生硬件故障时，可对对应模块进行不拆表更换检修；硬件升级或器件更换时，可以在现场直接对模块进行更换，不仅降低表计更换、升级的操作时间，还减少了因表计整体更换带来其他问题的几率，表计维护管理的成本大大降低。当电能表软件需要进行升级时，可以通过刷新模块程序进行单模块的升级，也可进行远程升级，大大提升了智能电表的使用寿命，降低了智能电表的使用成本。

针对载波通信系统的性能评价的需求，以云南电力研究院已建设的自动化实验室作为技术参照，将天龙经纬公司载波表出厂自动检测台的技术加以综合，开发一套结构合理、具有检测、价廉物美，能够实现对载波电能表有效评价的测试平台。

在研制的综合评价电力系统载波产品的检测装置和相应的测试软件上，对载波通讯系统技术指标的合规性进行了动态的测试和综合评价，为基于电力线载波通讯的电力营销计量自动化应用提供了技术保障

从昆明供电局电力营销计量自动化系统在用电检查和停电管理业务方面的应用案例出发，对计量自动化系统在反偷查漏和电力营销综合管理能力提升方面的作用进行了研究和分析，得出的结论如下：

一端接入供电局电力营销系统，另一端连接了配电网中各个计量终端、负荷终端、配变监测终端，通过各种通信网络对用电现场的计量数据进行实施采集，与上位电力营销系统进行信息交互的系统称为电力营销计量自动化系统，或简称为计量自动化系统。

在电力营销线损“四分”管理中，通过配电网拓扑图的绘制和维护，可以准确地建立校对各个考核点的线损计算模型，通过对计算结果的关联分析，实现从线损率计算到线损率和故障率降低的能力提升。在发现线损率异常时，结合现场用电检查，在反偷查漏、违约用电、违法用电的查证方面也取得了很好的效果，跨专业实践应用不仅发现了存在的窃电问题，还追回了损失电量，追罚了电费，挽回了经济损失。应用效果启发鼓舞人心。

电力营销计量自动化系统能够自动采集各个计量终端的停电事件信息和告警信息，通过和上位电力营销系统人工录入的停电事件信息进行比对，在由人工将比对出的停电事件信息差异表进行核实，有效的提高了停电事件采集的准确率。与传统的人

工录入停电事件信息、再通过电力营销系统的统计查询功能对停电事件信息进行查询分析相比,电力营销计量自动化系统在停电事件信息采集方法,停电事件数据采集准确性、完整性,停电事件相关数据计算效率和电力营销停电管理自动化信息化管理方面的提升都十分明显。

结论是令人鼓舞的,从今天作者的角度来看,通信的信道可选择的方式很多,如光纤、4G、5G、家用 WiFi,蓝牙等等,然而,对于电力企业来说,电力配电网络已经遍布千家万户,电力业务与电力线载波通信相结合,建立电能量数据的采集通信信道,是明智的,也是成功的选择。在作者刚工作时,电力行业对电力线载波人处于犹豫、试探中,回过头来看,如今电力线载波通讯已经覆盖国家电网和南方电网的居民用电的智能化管理和运营,同时载波的应用也在其他领域扩展,如华为在光伏发电场实现分布式并网逆变系统的载波通信、海尔空调室外机与室内的载波通信等,在新技术的加持下,相信电力线载波通信还有更广阔的应用空间。

随着通信技术、计算机技术和自动化控制技术在供电网络中应用的深入,极大地提升了传统电力营销业务的信息化和智能化水平。智能传感器技术与大数据云计算技术在电能量采集终端的应用,为电网运行状态监控、电能量供应提质增效、电网系统辅助决策提供了有力的技术支持,使得“电网自愈”逐渐成为可能。基于数据信息和算法匹配的电力调度,基于决策树和自动化远程控制的柔性输电技术为可再生能源开发与利用提供了基本保障。通信技术的发展和用电客户档案信息和用电信息的积累丰富,供电网络对用电客户用电习惯的画像将更为有效精准。随着用电数据量的不断增加,计算模型的不断训练,智能电力营销日趋成熟。

参考文献

- [1] 许博.基于直序扩频技术的电力线数字通信系统设计[D].成都:四川大学,2014,03.
- [2] 马晓奇.电力线载波通信技术发展现状及其应用前景[J].机电设备,2014,03.
- [3] 郭智波,郭智涛,徐向国.电力线载波技术在用电信息采集系统的应用分析[J].电子制作,2013,24.
- [4] 刘恒光.基于电源母线的星载 CAN 总线系统研究[D].北京:中国科学院国家空间科学中心,2016.
- [5] 刘艳.2FSK 调制解调的仿真分析[J].硅谷.2014,01.
- [6] 晏涌,裴梦瑶,刘学君,鲁莹,袁碧贤.基于 FSK 电力载波的温室大棚数据通信与监控技术研究[J].电子设计工程,2017,10(05).
- [7] 何金鹏.基于美国军标 MILSTD188110C Appendix C[D].北京:北京邮电大学,2017.
- [8] 刘明杰,周林,苗长胜,等.新一代智能电能表的发展探讨[J].电测与仪表,2017,54(18):94-100.
- [9] 孙毅,王永生,顾博川,侯艾君,李晓枫,黄莉.具备边缘计算能力的多芯智能电表设计[J].电子测量技术,2019,23.
- [10] 王立州,付飞亚,刘亚辉.基于 IR46 标准的新型智能双芯电表设计[J].自动化仪表,2018,39(5):20-24.
- [11] 周芝梅,赵东艳,张海峰,杜君,王维彬.基于 IR46 标准的双芯电能表主控关键技术研究[J].电子技术应用,2017,10.
- [12] 李红.基于电力线载波和 GSM 网络相结合的自动抄表系统研究[D].长春:吉林大学,2004.
- [13] 刘金华.基于 SOPC 的任意波形发生器的设计与实现[D].哈尔滨:哈尔滨工程大学,2009,11.
- [14] 冯平.低压电力线时间传递的研究[D].北京:中国科学院研究生院,2005.
- [15] 傅永耀.电力线载波通信的研究与实现[D].西安:西安科技大学,2006.
- [16] 翟辉.基于 SOPC 及 PLC 技术的智能家居控制器设计.大连:大连交通大学,2007.
- [17] 胡远洋.双极板电极导电性分布自动测试系统[D].西安:电子科技大学,2020,08.
- [18] 蔡伟,乐健,靳超,等.电力线载波通信信道建模技术综述[J].电力系统保护与控制,2012,40(10):149-154.

- [19]于清苹,史治平.5G 信道编码技术研究综述[J].无线电通信技术,2018,44(1).
- [20]GB/T18657.1—2002[N].
- [21]Q/GDW1376.1-2018 电力的用户用电信息采集系统通信协议[N].
- [22]刘春怡.学生公寓 BAS 网络技术化研究[D].河北:河北工业大学,2007.
- [23]施洸.低压电力线宽带载波高速通信关键技术研究及工程应用[D].南京:东南大学,2019.
- [24]王子龙.基于 ARM 的智能电表系统研究与设计[J]. 电脑知识与技术,2019,15(1):259-261.
- [25]李皓,韩成浩.具有无线通讯功能的智能电表设计与研究[J].吉林建筑大学学报,2016,33(1):85-88.
- [26]黄伟,彭显刚,邓小康等,一种可自适应多通信模块的智能电表设计[J].智慧电力,2017,45(2):43-48.
- [27]李志强,高大兵,苏盛等,基于大数据的智能电表入侵检测方法[J].电力科学与技术学报,2016,31(1):121-126.
- [28]蔡子伟,徐正全,王晓艳.基于时间扰动的智能电表隐私保护方法[J].计算机工程与应用,2019:1-13.
- [29]王兆军,矫真,刘丽君等.智能电表雷电感应过电压防护分析[J].电瓷避雷器,2018(5):93-98.
- [30]杨磊,施火泉,吴成瑞.基于 SOC 的负载识别智能电表的设计与实现[J].自动化与仪表,2016,31(11):19-23.
- [31]朱华,卢文斌.采用双锰铜取样的防窃电单相智能电能表设计[J].计量与测试技术,2016,43(7):1-4.
- [32]PAULA CARROLL,TADHG MURPHY,MICHAEL HANLEY,et al.Household classification using smart meter data[J].Journal of Official Statistics,2018,34(1):1-25.
- [33]ELLEN FRANCONI,DAVID JUMP.Leveraging smart meter data & expanding services[J].ASHRAE Journal,2017,59(9):18-27.
- [34]KODAIRA D,HAN S.Topology-based estimation of missing smart meter readings[J].Energies,2018,11(1):224.
- [35]徐京生.模块化设计在智能三相电表中的应用[J].仪器仪表与分析监测,2019(1):11-14.

- [36]王立州,付飞亚,刘亚辉.基于 IR46 标准的新型智能双芯电表设计[J].自动化仪表,2018,39(5):20-24.
- [37]周芝梅,赵东艳,张海峰等.基于 IR46 标准的双芯电能表主控关键技术研究[J].电子技术应用,2017,43(10):7-11,19.
- [38]刘春怡.学生公寓 BAS 网络技术化研究[D].河北:河北工业大学,2007.
- [39]侯志辉.智能抄表系统的研发与应用[D].河北:华北电力大学,2015.
- [40]陈文字.低压预付费电能表在惠州供电局的应用研究[D].广州:华南理工大学,2014.
- [41]扶忠权.基于 CPU 卡的三相预付费电能表的设计与实现[D].长沙:湖南大学,2009.
- [42]陈翔.基于 PLC 的智能计量装置测试[D].河北:华北电力大学,2012.
- [43]徐京生.模块化设计在智能三相电表中的应用[J].仪器仪表与分析监测,2019(1):11-14.
- [44]刘天柱.基于时间同步的直流充电桩双芯电能表的研究与应用[D].南昌:南昌大学,2020.
- [45]李荣琳.计量自动化系统在配网营销管理中的应用研究[D].广州:华南理工大学,2017.