

面向智能电网的低压电力采集嵌入式应用软件开发策略

周 鹏

南京林洋电力科技有限公司 江苏南京 210000

摘 要：低压电力采集终端的软件作为支撑智能电网发展的重要基础，对嵌入式应用软件开发有着严苛的要求，软件开发质量关系着电网数据采集的精度以及系统的安全运行。本文结合低压采集终端的特点，提出了嵌入式软件开发中最为关键的实时约束、资源受限、通信接口对接以及系统可靠性问题4个核心关键问题。对核心关键问题进行分析后，提出了面向智能电网软件的开发方法论，为低压电力采集工程应用提供技术支持。

关键词：智能电网；低压电力采集；嵌入式系统

一、研究背景

电力用户用电信息采集系统助力智能电网的建设，用户侧信息交互式功能需求不断增长，采集终端除了要满足定时采集和上报电能信息的要求，还须具备支持主站主动参数下发、程序远程升级、实时监测及主动事件上报等双向信息交互方式的能力，需把软件由被动式应用升级为主动服务式应用。采集终端还须具备应对分布式发电、电动汽车、需求侧管理等功能，对软件的扩展和协议兼容需求予以满足。负荷管理、用电分析、异常状态监测等边缘运算功能会逐步引入至采集终端，使采集终端的软件增加更多的数据计算算法和人工智能模型，计算能力的合理划分成为采集终端软件设计时需要考虑的问题^[1]。

二、面向智能电网的低压电力采集嵌入式应用软件开发策略

（一）分层架构模型的设计与构建

分层设计的软件架构便于对系统复杂度进行分解^[2]。

分层架构由硬件抽象层、操作系统层、中间件层、应用层等4层构成。硬件抽象层对处理器、存储器、通信接口等物理资源进行封装，完成硬件访问接口的搭建，在此基础上定义硬件抽象，屏蔽底层硬件差异，当硬件平台需要进行更新时只需针对硬件抽象层进行修改，应用层软件可无需修改。操作系统层主要提供任务、内存、设备驱动等操作平台，根据系统实际需求选择不同的操作系统，适合资源较多的系统选用嵌入式Linux，具有实时响应特性的系统可选用实时操作系统如FreeRTOS或μC/OS。中间件层提供通信协议栈、文件系统、数据库引擎等通用软件，其中协议栈需支持DL/T645、DL/T698等电力标准协议，文件系统完成配置参数、历史数据、日志文件等的存储。应用层包含业务功能模块，主要包括数据采集、通信管理、事件处理、本地显示4个模块，各模块借助消息队列或共享内存进行数据交互，完成各功能模块间的数据共享，以降低各模块间的耦合性。

表1 低压采集终端软件模块功能分配

软件模块	主要功能	接口协议	数据周期	优先级
数据采集模块	电表参数读取、数据校验	DL/T 645-2007	15分钟	高
通信管理模块	主站交互、数据上报	DL/T 698.45	实时/定时	高
事件处理模块	告警监测、事件上报	自定义格式	事件触发	最高
数据存储模块	历史数据管理、参数配置	FAT32文件系统	持续运行	中
本地显示模块	运行状态显示、按键处理	LCD驱动接口	1秒刷新	低
程序升级模块	远程程序更新、版本管理	TFTP/FTP协议	按需执行	中

（二）实时操作系统的选择与应用

（1）任务调度机制与优先级设计

RTOS为抢占式调度，高优先级任务中断运行低优先级任务，任务优先级设置不合理会严重降低系统响应速度。对处理事件（包括电压越限、停电告警等异常）的

任务优先级设置为最高，保证处理不延时；该任务的执行时间一般较短，不会长时间占用CPU资源。对处理和主站间数据交互的通信管理任务优先级设高，该任务会涉及到网络数据包的接收/发送，需要用到TCP/IP协议栈进行通信，任务执行时间较长但会被事件任务打断。

对定时触发采集电表数据的任务执行优先级设为中等, 该类任务受采集周期约束, 通常为15分钟一次, 对系统实时性需求一般较低, 允许一定延迟, 暂不考虑调度延时影响。对于本地显示及对日志进行记录的任务, 因对实时性不敏感故优先级设为较低。对于上述任务间通信, 采用消息队列机制: 发送任务把数据包进行封装后放到消息队列中, 接收任务从队列中读取消息并对消息中的数据进行处理, 而消息队列的长度则需按照数据流量设置, 避免队列长度不够造成消息溢出丢包现象^[3]。

(2) 中断处理与时间管理

中断处理是保证嵌入式系统实时性能的关键, 外部

事件借助硬件中断告知CPU, 中断服务程序及时响应, 处理事件。低压集抄终端的中断源有通信口中断、定时器中断、外部IO中断等, 中断服务程序的执行时间要尽量短, 通常只是完成必要的硬件操作和标志设置, 复杂的处理由任务完成。定时器中断用于提供系统时钟节拍, 操作系统的任务调度、延时函数、超时检测等都要求有系统时钟, 时钟节拍周期通常设置为1ms或10ms, 过小的时钟周期增加系统开销, 过大的时钟周期降低定时精度。硬件定时器必须校准, 消除晶振频率偏差和温度漂移的影响, 软件可以读取RTC时钟或接收NTP时间同步报文来校正系统时间, 保证采集数据的时间戳正确性。

表2 采集终端任务调度参数配置

任务名称	优先级	堆栈大小	周期/触发条件	CPU占用率	响应时间
事件处理任务	10(最高)	2KB	事件触发	<5%	<10ms
通信管理任务	8	8KB	主站指令触发	10-15%	<50ms
数据采集任务	6	4KB	15分钟周期	5-10%	<200ms
数据存储任务	5	4KB	数据到达触发	3-5%	<500ms
本地显示任务	3	2KB	1秒周期	2-3%	<1s
日志记录任务	2(最低)	3KB	事件触发	<2%	无严格要求

(三) 通信协议栈的开发与优化

(1) 电力行业协议的解析与封装

低压采集器需要支持协议下发、读写。电表通信协议是DL/T645-2007, 主站通信协议是DL/T698.45。DL/T645协议描述了电表读写的帧格式及数据标识, 该协议为有主从关系的通信模式, 采集器充当主站的角色, 向电表发送读取命令, 电表是被读的从站。报文由起始符、地址域、控制码、数据长度、数据域、校验码、结束符等域构成。协议解析程序负责帧头、地址、数据、校验等数据的提取, 收到完整的帧后, 根据控制码判断该帧是读抄量帧还是参数帧, 提取数据域的电能量或参数数据。DL/T698是一个面向对象的协议, 定义了COSEM对象模型, 具有复杂的数据结构和方法的调用, 协议栈较为复杂, 需要建立对象字典, 完成对象实例化、对象属性的读取、对象方法的调用等工作。协议封装程序根据应用层的数据要求, 构建符合协议的帧, 填充各个域的值、计算校验值, 再由通信接口发送。

(2) 通信接口驱动的开发方法

低压集中器的通信接口有RS-485接口、以太网接口、GPRS/4G模块等, 驱动程序完成硬件的初始化、数据收发、错误处理等功能。RS-485接口驱动程序完成对UART控制器的波特率、位数、停止位、校验位等配置功能, 如采用9600bps的数据速率、8位数据位、偶校验、1位停止位。驱动程序控制RS-485收发器的收发使能引

脚来调节工作状态, 驱动程序发送数据时使能发送, 接收数据时使能接收。以太网接口驱动程序采用TCP/IP协议, 物理层采用PHY芯片完成对电信号的调制与解调, MAC层控制器负责帧的发送与接收, 驱动程序对PHY寄存器、MAC地址、中断使能等参数进行配置, 驱动程序以DMA方式传输数据来提高传输的效率。GPRS/4G模块驱动程序发送AT指令来控制模块的工作状态, 完成网络的注册、拨号连接、数据传输操作, 驱动程序要对模块各种应答消息进行处理, 维护连接状态, 网络连接中断后重连。

(四) 电能计量算法的完成与优化

(1) 电能量的累计与冻结机制

电能量冻结是采集终端的一项基本功能, 按既定时间周期进行正向有功电能量、反向有功电能量、四象限无功电能量等电量的累积。电能量累计周期一般为15min, 每个周期结束后由软件读计量芯片的脉冲计数值, 计取周期的电能增量, 叠加累计值上。电能量数据采用长整数64位来记录, 防止数据溢出, 整数部分为kWh, 小数部分为kWh分数, 精度达到0.0001kWh。冻结是对特定时间点的电能量数据进行保存, 可以完成定时冻结、瞬时冻结、约定冻结等操作。定时冻结按日或月特定时刻触发, 瞬时冻结由远程主站向终端发送的指令触发, 约定冻结在特定的事件发生时触发, 如停电、电压越限。冻结数据需要保存多个冻结周期, 保存容量有限时采用循环覆盖机制, 优先保留近期的冻结数据。

表3 电能计量参数精度与存储规格

计量参数	测量范围	精度等级	分辨率	存储周期	存储容量
电压有效值	0-300V	0.5级	0.1V	15分钟	2880点/月
电流有效值	0-100A	1.0级	0.01A	15分钟	2880点/月
有功功率	0-30kW	1.0级	0.01kW	15分钟	2880点/月
正向有功电能	0-999999.99kWh	1.0级	0.01kWh	累计值	永久保存
功率因数	-1.000-1.000	1.0级	0.001	15分钟	2880点/月
零线电流	0-100A	1.0级	0.01A	15分钟	2880点/月

(2) 异常数据的检测与处理

采集系统要对采集到的数据进行合理性检查，及时发现异常数据。电压越限检测电压值是否在正常范围内，国内低压电网中线路标称电压一般是220V，允许电压偏差范围通常为-10%+7%，即198V235.4V，软件不断检测电压值，当电压超出允许范围一段时间以后，记录电压越限事件并上报主站。电流异常检测：当电流值在较短时间内突然大幅度跳变，可能反映负荷突变、发生故障等异常情况，软件记录事件并标记数据。功率因数异常：判断功率因数是否过低，功率因数过低会引起线路损耗增加，影响电能质量，软件能统计功率因数低于某值的时长，为用户用电分析提供数据。停电监测：监测电压值是否发生停电情况，当电压低于设定阈值并持续一段时间，判定为停电事件，采集终端采用后备电池供电，记录停电时刻与停电前的电能量数据，来电后记录来电时刻。

(五) 系统测试与验证方法

(1) 单元测试与集成测试

代码质量的保证离不开软件测试，软件测试主要分为单元测试、集成测试和系统测试等步骤。单元测试保证单个函数或模块功能的正确性，针对其设计测试用例时，需要针对正常、异常、边界值等情况开展测试用例设计，比如，针对电压采样处理函数设计用例，其中除了电压正常值以外，还包括上下限、负值、零等值用例，测试能否正确输出电压值；集成测试检验多个函数或模块的集成使用是否正确，可设计测试场景来模拟真实的业务场景，比如，数据采集和通信管理模块之间的业务交互，针对采集的数据能否正确上报主站进行测试；可使用自动化测试工具开展软件测试，借助脚本完成自动化测试用例的执行和测试结果的记录工作，自动化测试适用于回归测试，每次软件代码改动以后执行所有的测试用例，保证新代码没有引入故障。

(2) 性能测试与压力测试

性能测试分析系统在不同负载情况下的工作性能，

测试包括响应时间、吞吐量、CPU使用率、内存使用率等。响应时间测试衡量系统对外部事件的响应时间，如测得主站对采集终端下发通信指令到接收到采集终端返回数据的时间差，响应时间应满足系统实时性要求，通信指令的响应时间应小于1秒。吞吐量测试衡量系统在单位时间内处理数据量，如测得采集终端在单位时间内（如1分钟）采集的电表数据数量，吞吐量应满足实际应用的处理要求，一个采集终端通常管辖数十~数百个电能表。CPU使用率及内存使用率测试衡量系统资源使用状况，CPU使用率应预留出一定的余度，避免系统满负荷使用，典型情况下，CPU使用率平均值应低于60%，峰值应低于80%。压力测试把系统置于负载极限的情况下，测试系统稳定性及容错能力，如大量并发通信请求、网络丢包及延时、长时间连续运行等测试情况，观察系统是否出现崩溃、死锁、内存泄漏等异常。

结语

低压电力采集终端嵌入式软件开发涉及软件架构设计、协议研究与落地、算法优化、可靠性保障等关键技术领域。本文结合工程实际，分别对上述关键技术问题与解决途径进行了整体介绍，可以为软件开发人员提供一定的可操作的技术思路。随着智能电网的发展，采集终端所承载的功能更加丰富，采集终端中边缘计算、人工智能等技术逐渐应用于其中，软件的研究与开发面临着新的发展挑战。

参考文献

[1] 黄曲梁, 谢丁. 大电网调度智能化的关键技术分析[J]. 光源与照明, 2022, (09): 196-198.
 [2] 谷海彤, 张远亮, 卢翔智, 等. 基于物联网的高稳定电能计量终端软件研发与应用[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2021, 46(06): 133-138.
 [3] 李建勇. 浅析智能电网系统的发展与市场前景[J]. 电力设备管理, 2021, (04): 31-33.