**配电网智能断路器SOC芯片技术**

**项目建议书**

2020年5月11日

# 一、项目建设背景及必要性

## 1.1 项目建设背景

智能电网建设是全球在能源领域的重要战略部署，构建以信息化、自动化、互动化为特征的智能电网是电力行业的发展方向。智能电网的实现首先依赖于电网各个环节重要运行参数的在线监测和实时信息掌控，物联网作为“智能信息感知末梢”，成为推动智能电网发展的重要技术手段。

我国整个电力系统中，配电设备点多面广，配网是最为薄弱的环节。作为受端系统的核心部分，配网是提高供电可靠性至关重要的物质基础，是提高电网的防灾抗灾能力、确保终端用户不间断供电的最后屏障。随着对配电网供电可靠性要求的不断提高，高效率高准确性的配电线路主动智能控制势在必行。如电压闪变、相间短路、单相接地、浪涌等多种运行工况时刻威胁着配电网馈线的安全稳定运行；另外，台风、高温高湿、飞鸟、悬浮物、电缆沟水侵等环境因素，对配电网馈线的管理也构成了严重的技术挑战。传统上依靠人力在事后进行巡线再处理，不仅无法及时解决隐患，严重影响供电可靠性，同时也消耗了大量人力物力，对配电网线路的智能化管理提出来技术需求。

随着物联网技术，特别是基于无线传感网络技术的兴起，已经为这些问题的智能检测提供了可靠合理的解决办法。为了进一步推动配电网自动化的发展水平，就有必要进一步提升配电网断路器多层次控制网络的智能性，通过增加边缘计算等新兴应用基础，进一步提高在配电网智能检测与配电网智能控制之间的数据交互，实现本地化的应急管理响应的先进管理模式。

提升配电网断路器智能化水平的主要途径，是研制适合在工业级高电磁环境下的高可靠断路器控制芯片，以实现具有自主智能能力的配电网智能断路器多层次系统结构和功能。基于物联网和边缘侧人工智能技术的配电网断路器智能系统，可以依托物联网透彻的信息感知、可靠的数据传输、健全的网络架构、海量信息的智能管理和多级数据的高效处理能力，实现对配电线路运行参数的智能断路控制，通过对协作获得的各类传感器参数信息边缘侧实时或周期性的分析诊断，从而从边缘智能的层面，更好的保证配电线路的安全可靠，对提高配网供电可靠性及运行效率具有重要意义。

## 1.2 项目必要性分析

### 1.2.1 配电网智能断路器芯片国产化的必要性

2019年，国家电网正式提出建设“坚强智能电网”和“泛在电力物联网”的概念，建立到2024年全面建成泛在电力物联网的目标。提升信息化与自动化水平，实现安全运行的实时感知与精细化控制成为省级泛在电力物联网的当务之急。电网体系中上万个智能化场景都离不开芯片的使用，对智能断路器芯片的需求也将呈指数级上升。

据估计，泛在电力物联网建设将从电力行业逐步延伸到智能化生活，实现万物互联会给集成电路应用带来指数级增加，然而电力芯片国产化进程远无法跟上需求。大部分企业主要研发消费级芯片，而工业级芯片不仅研发成本高，且研发难度大，芯片需长期同步适应各种恶劣工业环境，对网络结构、操作频繁性、故障率等应用问题要求更高。芯片对外依存度高易存在三大隐患：一是随着泛在电力物联网建设的深化，芯片应用量将迅猛增加。断路器属于配电终端电器保护装置，是配电网的重要底层设备，如果出现技术问题，将严重影响到电网的安全运行。二是芯片严重依赖进口，定价权在国外厂商，价格居高不下。三是国外芯片出口有条件限制，供货周期及数量无法保证。为摆脱这一局面以及考虑到电网数据安全因素，国网体系鼓励自主设计工业级芯片。

芯片从设计到生产，涉及电子信息、材料学等多个基础学科，且在技术、专利、人才等多个方面存在壁垒，需要开放和跨界协作，在良好的发展生态圈中让应用单位、终端厂商、设计公司等协同推进电力芯片国产化进程，避免资源浪费，让断路器的微型化、智能化、物联网化打破传统，得到进一步革新。

### 1.2.2 配电网智能断路器芯片智能化的必要性

在开展微型断路器设计、选择和应用时，需引入智能化控制、引入物联网技术和引入微型化结构设计。其中智能断路器芯片智能化是利用智能控制器和人工智能技术调控断路器设备信号，使断路器更好地保护短路电流过大引起的负载故障问题，同时提高断路器的综合性能。微型化是指在满足高分断能力，大幅度实现产品的小型化。根据微型断路器芯片高限流性能的结构特点以及小体积结构布局，提出设计新思路微型化塑料外壳式断路器。

融入物联网技术的智能断路器芯片主要优势在于利用物联网技术对断路器的参数进行实时监视，例如：检测电压、电流、触头和开关位置，检测触头的绝缘水平超限报警，监测断路器本身的参数预计电气特性参数。例如第三代智慧小断路器和智能远程控制物联网配电箱，“机械双创+电子双重保护”，开发出第4代断路器技术智慧式微型断路器。

### 1.2.3 配电网智能断路器芯片协作化的必要性

考虑到结构设计、电气性能参数检测、物联网组网技术、人工智能技术，接入物联网技术的智能断路器芯片能够具有边缘计算、自动识别和自主决策功能。以新型智能断路器芯片等物联设备为基础，构建智能配网框架，包括新型MEMS传感器终端、手机App和自主诊断应用层的设计，能够实现监测智能断路器的电气指标实际运行情况，对故障断开点能够精准定位、即时信息处理及推送并能够快速处理故障灯。通过智能断路器芯片协作化能力的实现，进一步提升了配电网的智能化和可靠性。

# 二、技术发展现状及趋势分析

## 2.1 技术发展现状

如今，随着科学技术的创新推动了现代化工业迅速发展，电力企业作为我国重要的能源供给企业，在配电系统中越来越多地提倡应用通信、计算机、网络等技术,来保证供电质量并降低能耗，以改善现代人的生活方式与生活质量，从有意识地用计算机智能管理方式代替传统的人工直接操作为主的低压开关控制柜开始，尝试采用基于各方面性能较好的微处理器的智能测控保护装置。

从过去到现在，国内外普遍采取过以下几种方式。（1）在配电柜内增加大量智能检测仪表及互感器，如带通信功能的多功能仪表，并配合断路器脱扣线圈进行控制，利用上位机进行遥测、遥传、遥控，构成复杂，功能简单，但不能长期储存相关运行记录。（2）增加基于GPRS的信号发射模块进行现场电量参数的远传，再人工读取分析参数并控制断路器通断，但由于信号不稳定、检测不全面，只在少数供电局系统使用。（3）采用断路器智能脱扣器本身加装，蓝牙模块实现数据远传与控制，需配合各厂家专用控制软件和手持PDA，仅适用于小型专用配电系统。这些方法从断路器的硬件结构、控制系统、脱扣特性等对智能微端进行研究，但还不能满足低功耗的要求，还需更多的改进措施才能用于大型配电系统。

可见断路器作为终端电器保护装置，是配电网的底层设备，对其引入智能化控制、物联网技术和微型化结构设计可以更好地实时监视断路器相关数据和避免负载故障问题，对提升配电网信息化水平、实现安全运行的实时感知与精细化控制至关重要，是实现智能化、可视化、自动化、交互式的新型现代化配电网中不可缺少的一环。

随着智能配电的持续快速发展，研究人员对电源模块和电路模块控制程序进行设计优化，不断更新产品，又相继推出新型智慧小微断路器和智能远程控制物联网配电箱，如C65系列、S3系列和CM5X-125微型化塑料外壳式断路器等，辅助部分地区电网实现了24小时配电室电气参数和物理监测状态，并结合由分布式传感器、智能配电室巡检机器人、红外线组成的测温设备、定点巡航、可视人工智能等技术手段，实现了完全的智能监控替代手动巡检。综合以上手段，组成的配电网自动化系统又划分两类，第一类为无主站的馈线自动化系统，利用自动化开关隔离故障，确保正常模式运行；第二类为基于主站的配电自动化系统，依靠数据采集端、计算机系统进行工作。

如今国内配电网自动化系统到了综合建设阶段，已初步形成了智能电网运行控制和互动服务系统。我国配电网自动化系统主要由SCADA系统、GIS系统组成，通过配电网调控和集成的基础平台，利用配电网自动化系统实施网络分析和馈线自动化等应用功能，可以增强配电网调度功能，提高电网运行监控能力和故障响应处理能力，从目前管理现状和实际情况来看，骨干电网建设、管理和运维体系已较为完善，但仍存在一些不足。

虽然针对10kV通信接入网的技术研究较活跃，但各地试点工程中接入方式较多、通信网络服务质量差异性较大，其承载的业务主要包括：配电自动化业务和用电信息采集系统业务的远程通信部分，考虑到配电自动化业务涉及如开关设备控制之类的需求，每个配电网节点的运行和监控，每个重要节点配置视频监控、语音等业务需求、分布式电源接入控制的需求等，配电网在安全性、实时性和传输带宽方面有了更高的要求，需要具备高可靠性、高冗余能力、足够快的响应速度和较高的至少能满足各种业务高技术指标的带宽。而且随着智能配电室规模的增大，原有的配电室也随之增大，电网综合数据网络渐渐不能满足未来对分配室监控服务爆炸式增长的需求。

**2.2 技术发展趋势**

智能电网建设至今，围绕“三型两网”世界一流能源互联网企业建设目标，国内相关产业在不断强化技术创新，加快建设泛在电力物联网，期望在未来打造配网智能化管理新模式，消除传统模式中存在的种种弊端，全面提升电缆及通道数字化管理水平。

IEEE的对未来智能电网标准新策略是以能源互联和系统互操作为目标，致力于智能电网最关键和最复杂的跨域技术标准的开发，包括特高压输电、信息通信管理、大电网联网、安全及可靠性评估、分布式能源并网。IEEESA对智能电网远景标准及路线图主要集中在计算技术、通信技术、控制系统、车辆技术、网络安全、电能消费、家庭与智能电网，目标是利用潜在的应用场景，全面研究和提供下一代智能电网关键支撑技术。

智能配网运行中，为了确保自动化系统的高效工作，就要为智能配网创建起一个先进、完善的自动化系统平台，加强数据采集与检测技术并完善数据系统，对所得数据和结果进行整体归纳和总结，确保形成完整、科学的实施方案，并依托于地理图形来完成设备管理和检修，从而确保配网系统全过程、多环节、多维度管控，达到精益化、可视化、智能化主动运维管理的目标。

为了推进这一目标，要求底层设备融合物联网技术，加强对断路器智能终端异常问题的防范与处理，包括内置式一体化物联网和外置式一体化物联网两种方案，要能够实现边缘计算、自动识别和自主决策等功能，完成馈线自动化和智能巡检技术的深入运用。边缘计算使物联网设备在靠近物或数据源头（如微型智能断路器属于现场数据源）的网络边缘测与云计算互相协同，就近提供智能互联服务高效地对用电情况进行动态监测，维护系统的安全、稳定运转；利用自动识别技术可在断路器存在潜在故障时自动报警，自主决策是在配电网在线检测值超出设定阈值时利用深度学习能力尝试自我分析线路、查询原因并修复故障，这两项措施都可以加强人与设备、设备与设备间的信息关联与交互，实现参数检测、故障信息记录，状态巡检一体化。通过以上措施，能够高效地革除故障，确保在最短时内回归供电，当配网线路中有故障问题时，不会造成过大的影响。

# 三、项目主要研究内容

## 3.1 智能断路器SOC芯片概述

智能断路器SOC芯片应包括高性能主控芯片、通信芯片（包含了HPLC通信模块、蓝牙5.0通信模块）、外围接口芯片、AD采样芯片等部分，各部分概况及创新特点如下：

1. 高性能主控芯片应该能够支持较为广泛的指令集架构，可集成具有专用指令扩展设计的自主知识产权RISC-V指令集架构微处理器内核，工作主频超过400MHz，等效计算能力达到300MIPS，总线为多层次结构；
2. 通信芯片同时支持HPLC和蓝牙5.0版本以上通信能力，协议层支持开放协作的数据与通信管理能力，实现基于通信芯片层次的电力物联网生态，提升配电网不同设备节点间的数据共享与交换，支持以数据为基础的边缘侧协作化智能决策，为数据驱动的电力物联网管理能力提供协议支持；
3. 接口芯片应包括RS485等常用兼容接口，并支持丰富的外设接口，包括GPIO/Uart/I2C/SPI/I2S/PWM/PDM等，以及灵活的外部中断与计数器控制逻辑；
4. 集成中低速12bit高精度AD电路模块；
5. 集成支持算法升级的神经网络计算单元，实现对边缘侧感知数据的本地化分类、识别与决策智能；
6. 需解决强电磁干扰等问题，支持在工业级高电磁场环境下的稳定工作。

### 3.1.1 芯片架构



图1 芯片架构图

由以上架构图可知，高速外设和主从设备挂在AXI总线上，低速或带宽占用率低的设备则挂在AHB或者APB总线上。

图中主要功能模块分别为：

RISC-V为片上CPU，该SOC芯片设计目标工作频率为最高600MHz，可通过Jtag接口进行CPU调试。该CPU采用精简指令集计算(RISC)原理建立的开放指令集架构(ISA)，RISC-V是在指令集不断发展和成熟的基础上建立的全新指令。RISC-V指令集完全开源，设计简单，易于移植Unix系统，模块化设计，完整工具链，同时有成熟的开源实现和流片案例。

SYS\_Ctrl模块负责整个芯片系统的控制，包括系统工作模式、功能模块配置等基本功能。

DSP模块负责提供硬件算法加速，支持人工神经网络RNN计算，支持较强的边缘智能能力，以及对应相关解密算法的硬件加速支持。

Memory是片上集成的高速SRAM，提供芯片系统的数据缓存功能，挂在AXI高速总线上，可以配合DMA ctrl模块的设置实现与其他模块间的高速数据交互。

AD是片上模拟数字转换电路，提供12bit精度，最高频率50MHz，采用SAR结构实现的ADC。

HPLC是宽带电力线载波通信模块。

PMU模块提供片上电源管理，可以实现对芯片的多电压域、多时钟域的电源管理功能，从而达到芯片高可靠性的低功耗处理。

INTC是系统中断控制模块。

WDT是看门狗时钟电路。

此外还提供了丰富的外部接口电路模块，包括PWM、I2C、RS485、Uart、SPI等。

### 3.1.2 软件系统概述

此SOC芯片的软件部分是在RISC-V指令集架构的Linux软件系统上进行开发。

软件系统组成包括：

1. Linux操作系统内核，可实现eCos系统的功能。
2. 设备驱动，负责外部接口的设备驱动程序管理。
3. 各级应用程序，包括系统和各级初始化程序，HPLC和蓝牙协议层数据通信解析，协作/决策处理，中断处理程序等。

作为一个源代码公开的操作系统，Linux在具体应用中稳定可靠，可扩展性强，功能强大。特点如下：

1. 具有可配置性、可裁减性和可移植性，其主要技术特色是具有功能强大的配置系统，可以在源码级实现对系统的配置和裁减。
2. 在具备高性能的运算能力的同时，支持[TCP/IP协议](http://baike.baidu.com/view/7649.htm)栈，便于与GUI以及多种外设连接扩展，简化了硬件设计，维持小型化的同时降低了系统成本。

综合以上，结合芯片在该系统可实现的工作如下：蓝牙、HPLC通信协议层协作数据与通信管理；协作化智能处理实现不同设备节点间的数据共享与交换、边缘侧协作化智能决策；外围存储器接口控制和数据访问，存储器的初始化配置、工作模式配置、工作控制；外设接口收发帧数据操作；此系统包含的USB高速外设接口以及传统RS485、Uart、SPI、I2C等低速接口的通讯和控制；以及其他数据输入输出AD/DA电路控制和配置功能。

该软件架构图如下。



图2 软件架构图

## 3.2 主要研究内容

### 3.2.1 自主知识产权RISC-V架构微处理器

常用嵌入式中央处理器CPU有商用的ARM和开源的RISC-V。ARM的设计是基于早期RISC架构，其将设计授权给多家芯片厂商，此类芯片广泛应用于各类智能手机和其他智能设备中。RISC-V是RISC的第五个版本，RISC-V是一种开源技术，不属于某家特定公司，近几年发展快速，已经有多款基于RISC-V的芯片面世。RISC-V已经与ARM形成了竞争。

与大多数指令集相比，RISC-V指令集可以自由地用于任何目的，允许他人设计、制造和销售RISC-V芯片和软件。虽然这并非第一个开源指令集，但设计者使其可适用于现代计算设备，并考虑到了这些用途中的性能与功率效率，这一点意义重大。区别于一般的新指令集，该指令集还具有众多支持的软件。

本配电网智能断路器SOC芯片的中央处理器采用64bit的RISC-V架构核心，该RISC-V的设计和功能架构针对实际应用场景需求，提出了用一备一的1+1双核结构，具有自主知识产权的设计。该RISC-V设计的工作频率最高可达600MHz。

### 3.2.2 HPLC通信芯片IP核

宽带电力线载波通信HPLC是在低压电力线上进行数据传输的宽带电力线载波技术。宽带电力线载波通信网络则是以电力线作为通信媒介，实现低压电力用户用电信息汇聚、传输、交互的通信网络。宽带电力线载波主要采用了正交频分复用（OFDM）技术，频段使用2MHz-12MHz。与传统的低速窄带电力线载波技术相比，HPLC有相似处，但带宽更大、传输速率和可靠率更高，通信速率可达1Mbit/s以上，实时性强，抗干扰能力强，可以满足低压电力线载波通信更高的需求并实现芯片级互联互通，也能够适应未来逐渐增加的用电信息数据量和更高的通信实时性要求的情况。

1、信道访问和带宽管理技术：HPLC通信信道为共享信道，该技术解决了大规模节点共享信道的宽带管理问题，有效提高了通信带宽利用率。

2、自动快速组网技术：针对各种台区典型环境特点和规模差异，该技术解决自动组网和网络实施维护以及组网效率问题，提升了载波通信的效率及可靠性。

3、白名单技术：通过用户表档案定义白名单，可支持台区稳定运行，不跨台区交叉入网，能够很好地解决多台区串扰严重影响集中器载波模块的通信质量问题。

4、全网升级技术：随着业务的扩展，可能会对现有系统提出新的应用需求。窄带方案下，模块升级需要将模块摘除，升级后再装回，其繁杂的操作方式使得模块现场升级无法实施。HPLC全网升级技术可有效提升模块程序升级效率，升级命令及数据下发给集中器载波模块，并由集中器载波模块来进行后续自动的操作，无需人员干预和值守。

### 3.2.3 蓝牙5.0通信芯片IP核

蓝牙5.0通信芯片IP核，采用国内成熟蓝牙5.0授权IP，支持最多2主16从通讯，覆盖目前国网标准的2主3从通讯标准。该蓝牙5.0 IP具有国内自主的知识产权，IP对应的SOC商业化芯片产品已经量产并出货，经过实践验证和与市场同类产品相比，具有低功耗、高集成度、芯片实现面积小等多项优异的特点。该IP扩展支持蓝牙mesh，遵循工业级的可靠性，可提供具有安全且可扩展性的工业等领域互联物联网设备互联。

### 3.2.4 协作化物联技术及协作化智能行为模型

在现代电力网络中，智能断路器基本工作模式是根据监测到的不同故障电流，自动选择操作机构及灭弧室预先设定的工作条件，如正常运行电流较小时以较低速度分闸，系统短路电流较大时以较高速度分闸，以获得电气和机械性能上的最佳分闸效果。

智能操作断路器的工作过程简单可以概括为，当系统故障由继电保护装置发出分闸信号或由操作人员发出操作信号后，首先启动智能识别模块，判断当前断路器所处的工作条件，对调节装置发出不同的定量控制信息而自动调整操动机构的参数，以获得与当前系统工作状态相适应的运动特性，然后使断路器工作。

另外，智能断路器除了保护作用外，还有一定的控制作用，可以根据运行需要，投入、切除或者控制部分电力设备或线路。

智能断路器对于电力的保护功能和控制功能，通常是完成回路检测、机械特性检测、接触电阻检测等检测指标。若依靠人力日常检测运行状态并进行维护，存在检测效率低、工作量大、工作效率低的缺点。同时，受限于物理条件和检测人员专业水平和经验，检测结果的准确性难以保障；数据记录、上传和处理的过程繁复，使用检测数据的实际效果不能满足预期。

采用协作方式的物联网技术，可以通过改进网络终端的数据管理和通信机制，将网络中的通信业务管理由应用层转移至协议层底层，通过定义统一的应用数据封装格式，设计高效的节点间通信协作策略，有效避免不同通信业务的竞争，实现对带宽资源利用效能的最大化。

基于边云协同的思想，协作化物联技术同时支持本地自组网和接入云端两种模式。当存在联网需要时，节点通过智能网关计算最佳路由，选择合适的链路，与云端节点进行通信。而对于无需联网的本地应用，节点只在局域网中进行数据的获取、传输和处理，并针对设备行为做出智能化决策。

具体来说包括两个方面：

* 1. 物端自主：各个节点可以自主进行环境中的数据的发现、获取、传输和处理。
  2. 物间协作：物间协作体现在物物协作、端云协作、人机交互三个层次。

同时，基于协作化物联技术统一报文数据格式，标准化用于通信的软硬件接口，可以设计制造适用于不同厂商产品的模组。采用标准的应用编程接口，有效解决同源节点或非同源节点之间的通信协作和数据共享问题。

协作化智能的数据处理算法，目的是对边缘侧感知数据的本地化分类、识别与决策智能，通过结合电力场景设计与优化的算法、支持算法升级的神经网络计算单元，实现对于本断路节点的高分辨率的系统监测与预测。

基于协作化物联和协作化智能的系统检测预测系统，旨在结合协作化物联的通信数据共享能力与协作化智能行为模型算法，实现断路器的自动化和智能化，尤其可以为断路器的赋能，实现高效的边缘异常检测并提高预测能力。在本系统中，利用断路器芯片在通信层面的特性，即通信芯片支持开放协作的数据与通信管理能力，在本地实现数据和其他断路节点数据的协同管理，极大丰富了本地数据，为数据处理算法提供了时间、空间层面更加丰富的数据。

### 3.2.5 工业高可靠芯片设计加固技术

集成电路朝着更高集成度和更小体积方向发展，人们对芯片的可靠性及使用寿命的要求不断提高。针对本配电网断路器SOC芯片的工作场景，应采用高可靠性的工业级芯片设计加固技术保证芯片的质量和可靠性。

参照国军标和国际标准相关规范，我们针对芯片设计做如下加固技术设计：

1、设计可靠性

（1）工艺选择成熟工艺，全定制设计实现，通过调整相关工艺参数实现器件可靠性。

（2）电路设计方面，针对精度方面增加校准技术和补偿技术．并通过仿真分析进行参数优化设计；在模拟电路关键节点增加滤波电路，增大关键节点电容，提高电路可靠性。针对大电流指标，设计上对大电流所带来的各种次生效应进行仿真分析，除了常规的电路的前仿后仿，也要做物理层次的工艺仿真。设计上要针对大电流所导致的各种问题（如过流，过冲，过热等）进行设计。

（3）版图设计，关键器件增大间距，增加隔离确保版图设计的可靠性，并提高抗干扰能力。

（4）防静电设计，静电放电(ESD)是内部最容易出现的失效原因，提升ESD等级的IO防护单元进行设计，在高压管脚增加专用保护电路并进行冗余设计，确保防静电设计的可靠性。

（5）抗闩锁设计，采用抗闩锁能力高的IO单元进行电路整体设计，确保抗闩锁设计的可靠性。

（6）长寿命设计，在整体芯片设计上，严格按照工艺厂家的技术指标进行设计，流片后进行1000小时的寿命试验，并加做1000小时的寿命试验，从而确保芯片的长寿命要求。

（7）热设计在设计层面上，尽可能降低电路的功耗指标。

2、维修性设计

在版图设计时，适当的增加Dummy单元，便于出现小缺陷时进行局部修改。试量产阶段，预留硅片停在多晶前，可以通过修改金属进行功能修正。

3、保障性设计

（1）技术资料，编写产品使用说明书，并定期对其进行更新，并严格按照规定进行版本管理。产品说明书的主要内容包括：功能介绍、技术指标、使用方式、注意事项和典型应用的内容。

（2）内包装设计，采用定制的防潮、仿静电、能屏蔽电场和磁场材料；交付用户时采用真空包装；内包装应具备防静电标识。

（3）外包装设计，应具备包裹和缓冲功能，包裹和缓冲材料无腐蚀、抗静电性能，且不会破碎和粉化；有防潮、防震、防静电等防护标识。

4、测试性设计，在关键电路节点上放置相应的测试探测点，在电路仿真验证以及参数提取后的仿真验证基础上可以进行硅片级测试。提高测试覆盖率，通过CP和FT测试，充分筛选淘汰缺陷产品，必要时可增加板级测试内容。

5、封装设计，封装材料采用耐腐蚀、耐老化、不释放气体、不吸超期、不长霉的材料；确保采用的封装形式和封装材料能满足防潮、防盐雾和防霉设计的工业级产品要求。

### 3.2.6 高精度AD转化电路IP核

按采样频率区分，ADC可以分为奈奎斯特ADC和过采样ADC。采样频率等于或稍大于奈氏频率(一般为信号带宽的2~4倍)为奈奎斯特ADC；采样频率远大于奈氏频率的为过采样ADC。奈氏ADC有快闪型(Flash-ADC)，流水线型(Pilelined-ADC)，逐次逼近型(SAR-ADC)等。这类ADC各有优缺点，Flash-ADC工作速度快，但功耗、面积大；Pilelined-ADC工作速度适中，精度和功耗也中等，SAR-ADC速度比较慢，功耗较低。过采样ADC中，应用最多的是Δ∑ADC。由于Δ∑ADC相对于奈奎斯特类型ADC，对模拟电路依赖不高，能容易达到高精度，并且面积和功耗都不大，因此使用Δ∑ADC来设计高精度的AD转化电路。

高精度AD转化电路IP核采用已验证具有自主知识产权的IP，该AD转换电路的精度为16bit。片内集成6路16位的ADC，采用双端差分信号输入。Δ∑ADC的具体电路模块设计包括运算放大器，比较器，MOS开关，动态元件匹配和时钟电路。



图3 Δ∑ADC系统电路总框图



图4 全差分运算放大器



图5 比较器电路

如图3是设计的Δ∑ADC系统电路总框图，电路主要分4大模块，两个积分器，一个4比特量化器，数据动态元件匹配电路和两相不交叠时钟产生电路。

该ADC的动态参数设计如表1所示。

表1 ADC的动态参数设计

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 参数 | 典型 | 单位 |
| ADC位数 | 16 | bit |
| ADC采样速率 | 3.2 | kHz |
| ADC动态范围 | 88 | dB |
| ADC总谐波失真 | -95 | dB |

## 3.3 拟解决关键技术难点

### 3.3.1 高可靠性设计

产品的质量和可靠性是设计和制造出来的。在生产实践中，可能会由于设计不良而导致缺陷层出不穷，特别是在批量和自动化生产过程中，一旦出现设计缺陷，往往会造成极大的损失。针对此类缺陷，仅凭改善操作方法和革新工艺技术往往是难以奏效的，必须在产品设计源头加以控制，即在设计之初考虑产品的可靠性。可靠性设计强调质量控制开始于设计阶段，并贯穿于交货包装前的整个过程，是解决产品设计不良而造成缺陷的最佳途径。

在设计和生产中，拟解决的主要高可靠设计问题包括：

1、嵌入式CPU的backup设计，通过用一备一的1+1双核结构，在主CPU出现故障时，备份CPU实现无缝连接处理的功能。

2、工业级高精度AD转化电路，针对工业级应用温度范围宽的特点，增加温度补偿相关设计，提高ADC工作的鲁棒性。

3、工艺选择成熟工艺，加固ESD防护电路，增加版图隔离提高可靠性和抗干扰能力。

4、环境适应性设计，本产品的工作温度：-55℃~110℃。

5、采用的封装形式和封装材料能满足防潮、防盐雾和防霉设计要求。

6、工业级电磁兼容性设计。

### 3.3.2 HPLC通信模块机制优化问题

HPLC通信模块，用于产品在电力线介质上的数据传输、数据读取、信道管理、停电事件上报、系统管理。拟解决问题有：

1）优化网络调度机制：基于全网信标同步机制，结合 CSMA/TDMA 算法，实现对载波信道的有序管理，有效规避台区间相互串扰，保证事件可靠实时上报。

2）优化网络拓扑结构：应用自适应的代理节点控制、选择、均衡等网络层优化算法，具备网络路径自动优化、自动实时修复等能力，保证组网时效性及稳健性。

3）数据预缓存、并行上传机制：使宽带充分发挥其高带宽的技术特点，实现对台区所有设备进行饱和、密集的数据抄读。

4）内嵌强大的系统管理功能：能够直观进行系统运行信息、在线节点、网络拓扑的故障诊断和异常分析，真正实现与用户之间的“电力流、信息流、业务流”双向互动。

**3.3.3 协作化物联网络的安全风险防范**

物联网普遍存在遭受网络攻击类型多样化、没有安全保护标准、数据极易被截获或破解等风险，主要集中在：

1. 缺乏对设备、服务提供商、应用、数据、交易的认证鉴权；

2. 缺乏对数据的非否认性、数据完整性保护；

3. 缺乏私有密钥、公钥密钥的管理和使用；

4. 缺乏应用配置管理和弹性保护机制弹性；

5. 缺乏长效监督机制，被遗弃设备再次接入网络时，无法第一时间进行安全升级。

核心问题在于缺乏设备、服务提供者、应用、数据、交易等物的安全认证机制。物联技术的安全与传统网络安全存在着差别，比如，在物联体系中，任何设备节点都能成为攻击的发起点和作用对象；物联设备的连接极大的增加了危害的传播范围；物联网络中多维的设备类型会增加信息泄露的风险和泄露信息的维度；设备部署在复杂的物理环境中，资源受限、缺乏物理保护、无人值守；设备的部署随意，设备使用周期差别较大，设备更新管理难度大。

协作化物联网络技术将配电网的服务拓展到网络边缘和终端设备，由于其互操作性和分布式等特性，以及终端计算能力、存储空间以及能耗的限制，需要综合考虑并设计相对应的安全防护技术。对于智能断路器这样的弱终端来说，需要满足基本安全需求，比如DTLS、双向认证、密码管理、远程升级等。

### 3.3.4 智能断路器的工作状态识别和自适应调整

系统故障由继电保护装置发出断开信号或由操作人员发出操作信号后，首先启动智能识别模块，判断当前状态即断路器所处的工作条件，对调节装置发出不同的定量控制信息并自动调整相关参数，以获得与当前系统工作状态相适应的运动特性，然后使断路器动作。

其核心在于根据监测到的不同故障（剩余电流、闭锁、过载、欠压、过压、缺相；过电压，过电流，漏电流和电弧），针对不同电流类型（短路电流、过载电流、小电容电流和小电感电流），先识别其类型，再自动选择操动机构参数及灭弧室预先规定的工作条件（如漏电流：电流小时低速断开，电流大时高速断开），以获得电气和机械性能上的最佳断开效果，提供（过载）长延时、（短路）短延时和（短路）瞬时三段保护，并尽可能减少在没有安全隐患的情况下提示关闭设备和电器误报的情况。

随着时间的流逝和处理数据的增大，智能识别模块应当能够主动学习并自适应调整，选择需要的信号或数据，从而更加准确地判断，减少误判率，变得更加智能。

对于断路器所在的电力网环境，更应考虑各个节点之间的关系，构建合理的数据处理方法与算法，实现超越传感器检测信号精度、检测指标量的系统状态判断方法，并且对本地未来工作状态和控制状态、电力控制状态需求等多维度问题进行预测，如果能对其他断路节点的状态检测与预测提供辅助，则会是更好的解决方案。

### 3.3.5 智能断路器的健康监测和预测性维护

为了保证配电线路的安全可靠，提高配网供电可靠性及运行效率，需要对智能断路器进行实时或周期性的健康监测和预测性维护。

通过对协作化物联技术获得的各类传感器参数信息，利用其不同的特性（传感器类型、时间相关性、空间分布特征）进行适当的预处理，涉及针对不同传感器的大量并行处理。之后使用不同的机器学习方法或专家系统方法确定断路器的运行状态及故障概率，或者预测断路器的寿命并确定维护的优先级。预处理和学习算法及超参数化需要手动创建或者利用AutoML领域相关的知识自动化进行。

该方法可设定不同的典型预测目标，一个目标是预测系统的健康状态，例如，是运行良好还是出现故障，并计算设备的剩余使用寿命（RUL）和健康状态的概率分布。另一个目标是预测设备的健康指标，该指标描述了系统的性能是否下降。

### 3.3.6 边缘侧硬件快速计算与响应实时性问题

为实现对边缘侧感知数据的本地化分类、识别与决策智能，需要集成支持算法升级的神经网络计算单元。相对云端应用，边缘设备的应用需求和场景约束要复杂很多，针对不同的情况可能需要专门的架构设计。抛开需求的复杂性，目前的边缘设备主要是执行“推断”。推断与训练不同，更强调吞吐率、能效和实时性。

近年来，随着深度神经网络技术的发展，出现了很多开创性的神经网络架构，具有代表性的网络结构有 AlexNet、VGGNET、GoogleNet、ResNet、R-FCN、Deformable-ConvNets 等等。然而，这些网络通常包含数以百万计的参数，几十到几百个卷积层，需要数十亿次的算术运算。 目前嵌入式硬件加速设计普遍存在处理速度相对较慢，与高速应用不适配等缺点。因此非常需要针对设备的特点，有针对性的进行优化设计，加快运算速度。

在提高推断效率和推断准确率允许范围内的各种方法中，降低推断的量化比特精度是最有效的方法。此外，提升基本运算单元（MAC）的效率可以结合一些数据结构转换来减少运算量，比如通过快速傅里叶变换（FFT）变换来减少矩阵运算中的乘法；还可以通过查表的方法来简化MAC的实现等。另一个重要的方向是减少对存储器的访问，这也是缓解冯·诺伊曼“瓶颈”问题的基本方法。利用这样的稀疏特性，还需要拉近运算和存储的距离，比如把神经网络运算放在传感器或者存储器中。

系统能否支持对数据处理方法算法进行远程升级，也决定了这断路器解决方案是否灵活。断路器的远程升级，可以对本地存储的数据和模型进行调整，部署新的计算方法，减少断路器更换成本，提高断路器的工作性能和工作效率。

## 3.4 关键技术方案

### 3.4.1 芯片时钟方案设计与低功耗策略

时钟设计方面，采用PLL和数字分频电路结合的方式来实现时钟频率的调整，从而达到调整功耗和性能的目的。时钟通路采用foundry提供的标准clock gating cell来确保clock gating的时序。最后的Test MUX用来支持DFT的clock bypass feature。

根据调整的精度和系统复杂度的均衡要求，可以根据需求采用一套或者若干套上述的时钟方案。

在功耗控制方面，芯片可以采用时钟分频器、门控时钟和多电源域设计，DRX，DVFS等多种方法。时钟分频器可以在不关闭模块功能的情况下，动态的调节功耗和性能。因为不需要关闭模块功能，所以整个流程比较简单，恢复响应速度快；门控时钟和多电源域设计可以确保在在不同的工作模式，彻底关闭不需要工作的模块。这种方案节电彻底，但是唤醒流程牵涉到多个模块，相对比较复杂；通过内部计时器，定时唤醒处理器，实现DRX功能，达到节电的目的；在某些特殊情况下，可以采用DVFS技术把一些需要长期供电但是可以慢速工作的模块功耗降低。比如把供电电压从1.1V降低到0.7V，工作频率从600M降低到50M。



图7 Clock方案设计

所有的低功耗策略都通过CPF格式进行全流程管理。片内模块对全片电源域以及电源开关进行全局性控制。

### 3.4.2 基于协作化物联的通信及协同数据管理

协作化物联系统需要解决节点相互识别与信息交换以及通信管理与数据管理两大关键问题，同时考虑系统性能与功耗的平衡。

3.4.3.1高安全协作化物联技术

高安全协作化物联技术是在协作化物联通信管理的基础上，根据3GPP安全标准进行了两方面的扩展，一方面扩展了国际标准的安全通道协议，采用了基于标识的IBC技术，使用设备的唯一标识作为公钥降低证书和密钥管理的复杂度；另一方面对通信内容进行加密处理，采用标准的SM9国密算法，使用安全芯片提供加密和认证功能。

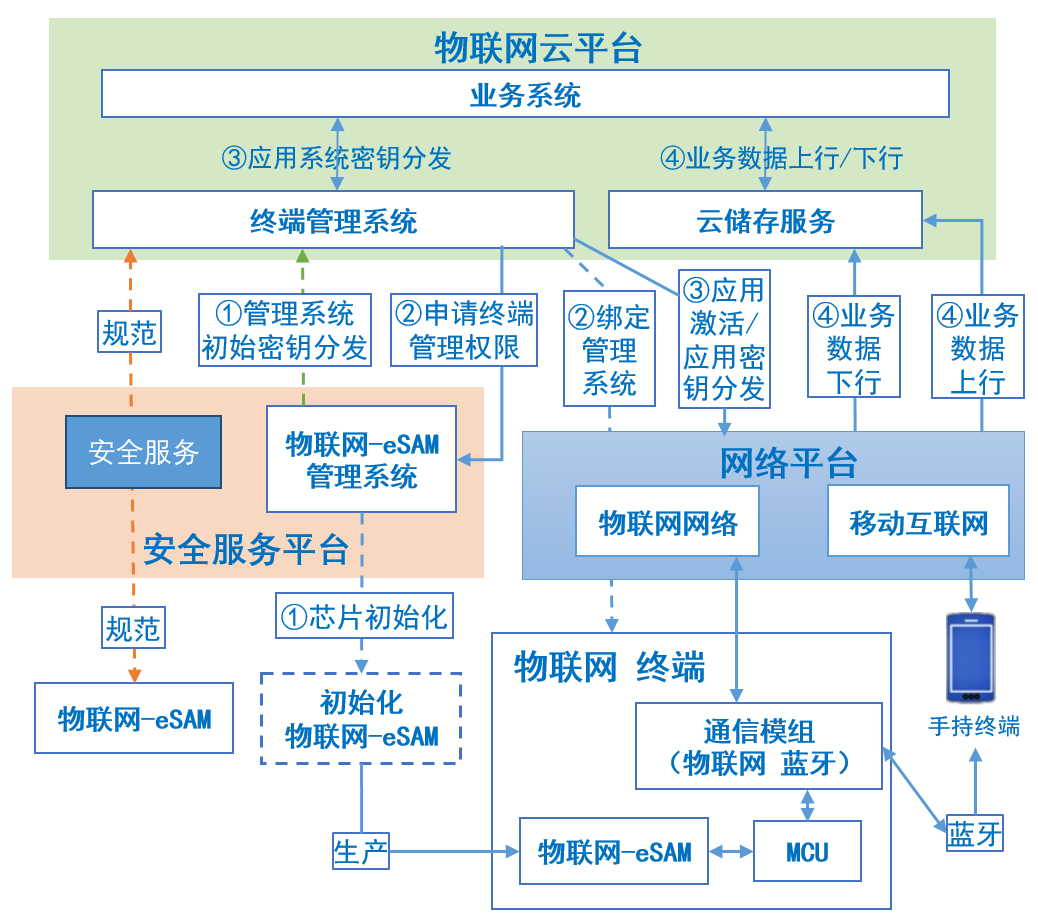


图8 物联网平台结构

每个终端预置唯一的标识和认证凭据，认证凭据可以基于共享秘钥、数字证书或其他技术解决方案，并且必须受到保护以防篡改，从而确保每个设备被正确识别。

为保证传输数据的机密性和完整性，应该使用用于安全传输的标准协议，如TLS和DTLS。

根据使用场景和最小权限原则，收集传输个人或隐私数据需提供明确的声明并提前获得授权；敏感数据必须加密存储，且数据所有者有权定义其留存器，在期满后数据应该被及时删除。

技术方案主要考虑：

1、传输安全：主要是传输协议的保护，包括DTLS/+、PSK、协议防攻击和传输加密，基于断路器资源有限性及特殊需求，考虑DTLS等协议的轻量化处理（DTLS+）；

2、物理安全：根据断路器所在环境特征，考虑其耐高温、抗电磁干扰、物理损坏等；

3、数据安全：保障静态数据、内存数据以及被传输数据的保密性、完整性和可用性，数据的加密存储和定期销毁。

3.4.3.2 断路器节点间数据共享策略

协作化物联技术在核心通信管理基础上，增加了节点间三个智能化流程，即环境节点探测、身份信息识别和交互协同操作。环境感知阶段，是实现节点连接建立、节点上下线、故障节点上下线的策略。完成环境感知后，身份识别阶段是各个节点利用身份标记身份标记对格式化规范描述的节点信息进行交换以识别节点信息。完成前两个阶段的连接后，节点之间的数据才能进行交互协同的操作，比如数据共享。

在完成节点互联后，断路器节点间的数据共享策略，是为了实现其他节点对本地数据的需求而设计的管理策略。当本地节点需要其他节点的数据时，向该节点发送相关的数据请求。当本地断路器节点收到其他节点的数据请求时，则采集本地传感器的实时数据并解析，将解析后的数据推送至发出请求的节点。当传感器采集数据发生变化时，系统缓存的身份标记会随之更新，并根据设计好的规则，将更新后的数据提前推送至目标节点。

基于统计信息的消息预取及推送，对于网络中的某个具体节点，基于数据生产者的角度，节点作为数据的提供者，通过自身所配置的传感器感知环境数据，可以基于统计信息将数据推送至其它节点；基于数据消费者的角度，节点执行动作或者做出决策任务还依赖从其他节点获取到的数据，可以基于统计信息进行提前预取。

3.4.3.3 本地节点数据存储策略

断路器节点的本地数据存储策略面的对象有两个：身份标记和断路器指标数据。具备协作化物联的信息交换过程，需要节点彼此之间有更为充分的认识，即节点需要掌握其他节点更多的信息，“身份标记”是对信息进行格式化规范描述的数据，存储在各个断路器节点的本地。

存储的身份标记，将节点通信所需的源地址、目的地址、校验位、数据包长度、节点设备类别、节点优先级和节点支持的功能操作信息等字段按照一定顺序封装为类或者结构体形式的数据集合，包括内涵和外延两部分。网络每个节点都存储有一张网络节点状态信息表，保存中网络其它节点的身份标记所包含的节点身份信息，每当收到新的报文时，按照表中的身份标记对报文进行解析，提取报文中的有效信息。

断路器指标数据的存储策略，其存储对象是断路器本地节点和网络中相关节点的断路器指标数据，数据来源为各检测传感器数据及数据融合后的结果。采用FIFO先入先出队列，根据时间先后顺序进行数据存储，保证了数据存储的规范性和读写性，同时可以软硬件协同优化数据存储和读取速度，实现性能的提高与功耗的管控。

3.4.3.3 低功耗的通信唤醒策略

物联网节点行为数据在系统中最简单的存在形式就是日志。系统在运行过程中都产生大量原始日志，每一条记录表示一次用户行为和对应的服务。比如光照强度、温度、湿度、节点工作状态、节点移动速度等，每一次服务请求和应答都会生成一个展示日志，其中记录了查询和返回结果。不同的节点对不同的业务信息请求频率和响应频率是不同的，必然有高频率的请求响应和低频次的请求响应，即不同节点间的联系紧密程度是不同的，如果各节点能够对自身的请求和被请求记录进行阶段性记录和分析，就能够发现不同节点之间的行为联系。

### 3.4.4 基于协作化智能的技术方案

为了减少定期检修的维护成本和应对突发故障所需时间，设计收集设备与其他设备的大量数据，并使用这些数据进行自动化的设备状态检测预测，制定了基于协作化物联和协作化智能的系统检测预测技术方案。

可利用的感知设备包括：

1、传感器：温湿度传感器、浸入式传感器、振动传感器、漏电传感器、电流/电压传感器、压力传感器、磁力传感器、水浸传感器等；

2、其它：红外、RFID、GPS、视频等。

构建协作化智能行为模型时，上节中的协作化物联方案在收集数据阶段提高准确率和可靠性，在不借助IOT网关或者云这样的集中式高算力平台的情况下，实现高实时性和高精确度的轻量级边缘计算。

通过协作化物联本地节点数据存储策略，实现统一封装格式的身份标记辨识，减少顶层应用开发与底层通信管理成本，进而消除传统集中控制式架构下控制节点接收、解析和转发数据报文所造成的额外通信时延，提升网络节点吞吐量，降低端到端通信时延，也增加了协作化智能方案利用环境数据进行分析的可靠性与准确性。

通过协作化物联低功耗的通信唤醒策略，帮助协作化智能技术方案获取关联度更高的其他节点信息，针对环境中的状态变化进行识别并执行响应动作，降低了本地运算的数据量和复杂度；预先发送和获取的数据提高了本地计算的实时性，也减少了不必要的计算开支。

以下是技术方案的具体实现：

（一）基于环境参数时间序列的智能断路器故障识别方法

通过基于协作化物联的通信及协同数据管理策略，获取断路器节点所在网络环境中的感知设备数据，为对这些环境参数序列进行分析，提出一种基于环境参数时间序列的智能断路器故障识别方法。

下表列出典型的深度神经网络的特点和在电力物联网中的应用场合：

表2 几种深度学习模型的特点及应用

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| 模型 | 优势 | 劣势 | 应用场合 |
| SAE | 强感知力 | 受限于反馈机制 | 电力设备故障诊断、  图像语音识别 |
| DBN | 迁移学习特性 | 学习深度有时有限 | 电力系统暂态稳定评估 |
| RNN | 能实现复杂  非线性映射 | 梯度弥散现象 | 电力大数据融合与检测 |
| CNN | 强泛化能力 | GPU、样本要求高 | 电力设备图像识别 |
| DRN | 知识表达  能力强 | 模型验证复杂 | 短期电力负荷预测、  优化分类 |

结合稀疏自编码器SAE模型的强感知特点与LSTM长短时记忆网络在时序相关信号分析上的优势，训练一种自适应深度神经网络进行故障概率预测。利用傅立叶系数，梅尔频率倒谱数据和小波特征（既具有频率分辨率又具有时间分辨率，适合于分析具有动态频谱的信号）作为输入，利用栈式稀疏自编码器SSAE（Stacked Sparse Auto-Encoder）提取高维稀疏特征，使用主成分分析将特征数量限制在合理的范围内，信息压缩和融化得到融合的特征矩阵，再作为LSTM网络的输入进行故障的分类。

另外，我们提出一种使用基于图的电力数据融合方法，同时使用基于RNN和LSTM序列分析方法进行异常检测。

（二）基于模糊逻辑和专家系统的智能断路器健康状态检测/寿命预测方法

结合了断路器监控值的已知限制（例如，操作次数，接触电阻，气体温度）来开发模糊专家系统，以及无监督的学习算法（例如，k均值和分层聚类）形成与断路器故障概率相关的数据簇。最后，使用相同的输入来训练可预测断路器寿命的神经网络。

当预测到当前断路器节点寿命低于给定的安全阈值时，利用基于统计信息的消息预取及推送策略，提前主动将故障信号和异常信息推送到其他节点，辅助其他节点进行状态监测和故障识别。当当前断路器节点一直处于健康状态时，数据主动推送的周期间隔也随之延长，以减少节点功耗，提高续航时间。

（三）协作化智能下的电力环境模型

通过电力网内传感器采集断路器所在电力网内部环境，通过外部传感器采集断路器所在实际物理环境，结合信号语义，对断路器内外环境进行建模，用以判断断路器工作状态与工作环境特性，提供突发事件预警、故障预测、寿命监控等功能。

### 3.4.5 适应电力网环境的边缘计算的神经网络技术

（一）在本地部署边缘计算协作化智能模型的流程

嵌入式系统中的智能通常使用MCU、DSP以及低功耗的MPU，来运行轻量级的智能模型，或者更复杂系统的前级处理，并在精度与算力上合理取舍。配电网中断路器节点在本地即边缘侧完成感知数据的分类、识别与决策智能，需要精简模型规模，配合高度优化的底层代码，并结合设备的特点，充分利用异构计算单元。

在边缘侧部署机器学习模型的工作分为PC端和设备端两部分，前者完成建模与训练、模型的转换与量化，以及模型部署的上位机工作如模型与工程的合并、数据的下载等，并支持远程升级，对本地存储数据和模型进行调整，部署新的计算方法，减少断路器的更换成本；后者将智能模型与其他模块对接，收集输入数据并运行模型完成推断。

深度学习的基础是构建多层神经网络（NN），搭建适用于边缘侧的神经网络一般需要3种主运算和主运算之后的加工操作。使用这三种基本结构并且适当处理输出后，形成神经网络的一个层即一级运算，每个层类似电路元件按串联、并联、混联的方式组合形成复杂的神经网络。此外，在训练模型期间，还会加入一些辅助运算，比如批正则化（batch normalization）、随机丢弃（dropout）等，以提高训练效率。在把模型转换成可供部署的形式时，这些附加部分被舍弃或合并。

（二）稀疏LSTM硬件架构

协作化智能涉及对时间序列的处理，无论是RNN还是LSTM模型都涉及到大量的矩阵乘法和向量乘法运算，会消耗大量的硬件计算资源和带宽。为了实现硬件加速，通过剪枝算法去除影响较小的权重。使用bank-balance稀疏LSTM硬件架构方案：

整个硬件架构主要包括PCle控制，DDR控制接口，指令控制，PE阵列，矩阵存储，向量存储，之后的点乘和累加等。指令类型：

1）load/store：这两个指令用于从DDR中加载数据到片上或者从片上存储数据到DDR中。

2）computational指令：根据LSTM的运算模式分成了两种，一个是SpMxV指令，用于计算矩阵乘法，另外一个是EWOP，这个用于点乘，累加，三种激活。

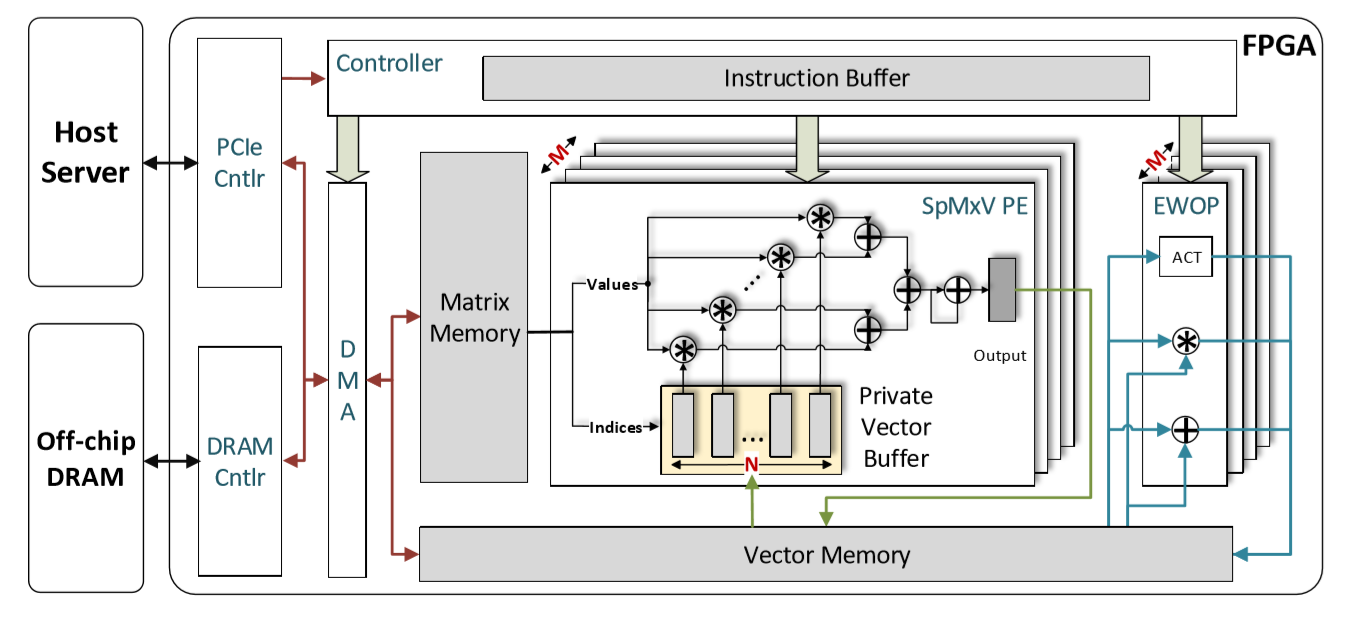


图9 稀疏LSTM硬件架构图