**配电网智能断路器SOC芯片技术**

**项目建议书**

|  |  |
| --- | --- |
| **依托单位：** | 清华大学深圳国际研究生院 |
| **项目负责人：** | 张盛 |
| **电子邮箱：** | zhangsh@sz.tinghua.edu.cn |
| **移动电话：** | 13632683550 |

2020年4月30日

# 一、项目建设背景及必要性（张朝霞）

## 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 （张朝霞）

### 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”，到2024年全面建成泛在电力物联网。就配电网而言，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。断路器属于配电终端电器保护装置，在配电网中具有重要作用。作为配电网的底层设备，断路器的微型化、智能化、物联网化使得传统配电自动化四遥功能得到进一步革新，相应地堆网络结构、操作频繁性、故障率等的应用问题也提出了更高要求。

### 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、现状分析（巨鸣）

## 2.1 产业现状

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，在配电系统中也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。近几年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。

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。

近年来，随着智能配电的快速发展，一些公司相继推出了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。

近几年针对10kV通信接入网的技术研究较活跃，而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，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、接口芯片、AD采样芯片等部分，能够完成完整的系统芯片功能；高性能主控芯片应该能够支持较为广泛的指令集架构，并支持较强的边缘智能能力；通信芯片支持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，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智能决策；接口芯片应包括485等常用兼容接口；集成高精度中低速模数转换AD电路；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。

支持边缘智能的断路器控制芯片应具有以下创新的技术特征：

1）主控芯片具有更强的计算能力，集成具有专用指令扩展设计的自主知识产权RISC-V架构微处理器内核，工作主频超过400MHz，等效计算能力达到300MIPS；

2）通信芯片支持开放协作的数据与通信管理能力，同时支持HPLC和蓝牙5.0以上版本通信协议，实现基于通信芯片层次的电力物联网生态，为数据驱动的电力物联网管理能力提供协议支持；

3）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；

4）支持丰富的外设接口，包括GPI/UART/I2C/SPI/I2S/PWM/PDM等，以及灵活的外部中断与计数器控制逻辑；

5）工业级高可靠强电磁场条件下的工作；

6）集成24bit高精度AD电路模块。

### 3.3.1 芯片架构（邵博士）

智能断路器SOC芯片应包括高性能主控处理器CPU、HPLC通信模块、蓝牙5.0通信模块、模拟AD采样电路、外围接口控制器等部分，能够完成完整的系统芯片功能；主控处理器能够支持较为广泛的指令集架构，可以实现系统需求的系统工作，完成边缘智能、数据交换处理与通信管理、外设配置协调工作等。

整个芯片采用RISC-V核处理器架构，工作主频600MHz，等效计算能力达到300MIPS；总线为多层次结构；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1 芯片架构图

### 3.3.2 软件系统概述（邵博士）

此系统的软件是在RISC-V指令集的Linux软件架构系统上进行开发。

Linux的特点是可配置性、可裁减性和可移植性。它的一个主要技术特色就是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。

Linux可以使系统具备高性能的运算能力的同时便于与各种外设连接扩展，简化了硬件设计，维持小型化的同时降低了系统成本。Linux作为一个源代码公开的操作系统，在具体应用中稳定可靠，并且支持[TCP/IP协议](http://baike.baidu.com/view/7649.htm" \t "_blank)栈、GUI已经多种外设等，可扩展性强，功能强大。

此平台软件主要完成的工作如下：蓝牙、HPLC通信协议层协作数据与通信管理；协作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；此系统包含的外设有USB高速接口以及传统RS-485、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。



图2 软件架构图

### 3.3.3 软件系统说明（邵博士）

1、 Linux内核

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、应用程序

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。

## 3.2 主要研究内容

断路器智能控制器芯片研发的主要研究内容包括：

### 3.2.1 自主知识产权RISC-V架构微处理器内核（邵博士）

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，允许任何人设计、制造和销售RISC-V芯片和软件。虽然这不是第一个开源指令集，但它具有重要意义，因为其设计使其适用于现代计算设备（如仓库规模云计算机、高端移动电话和微小嵌入式系统）。设计者考虑到了这些用途中的性能与功率效率。该指令集还具有众多支持的软件，这解决了新指令集通常的弱点。

### 3.2.2 HPLC通信芯片IP（张朝霞）

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而言，HPLC技术具有带宽大、传输速率高，可以满足低压电力线载波通信更高的需求。HPLC作为本地通信技术还融合了远程通信（4G）应用在集中器I型上。有线技术融合无线技术是HPLC应用的一个特点。

### 3.2.3 蓝牙5.0通信芯片IP（邵博士）

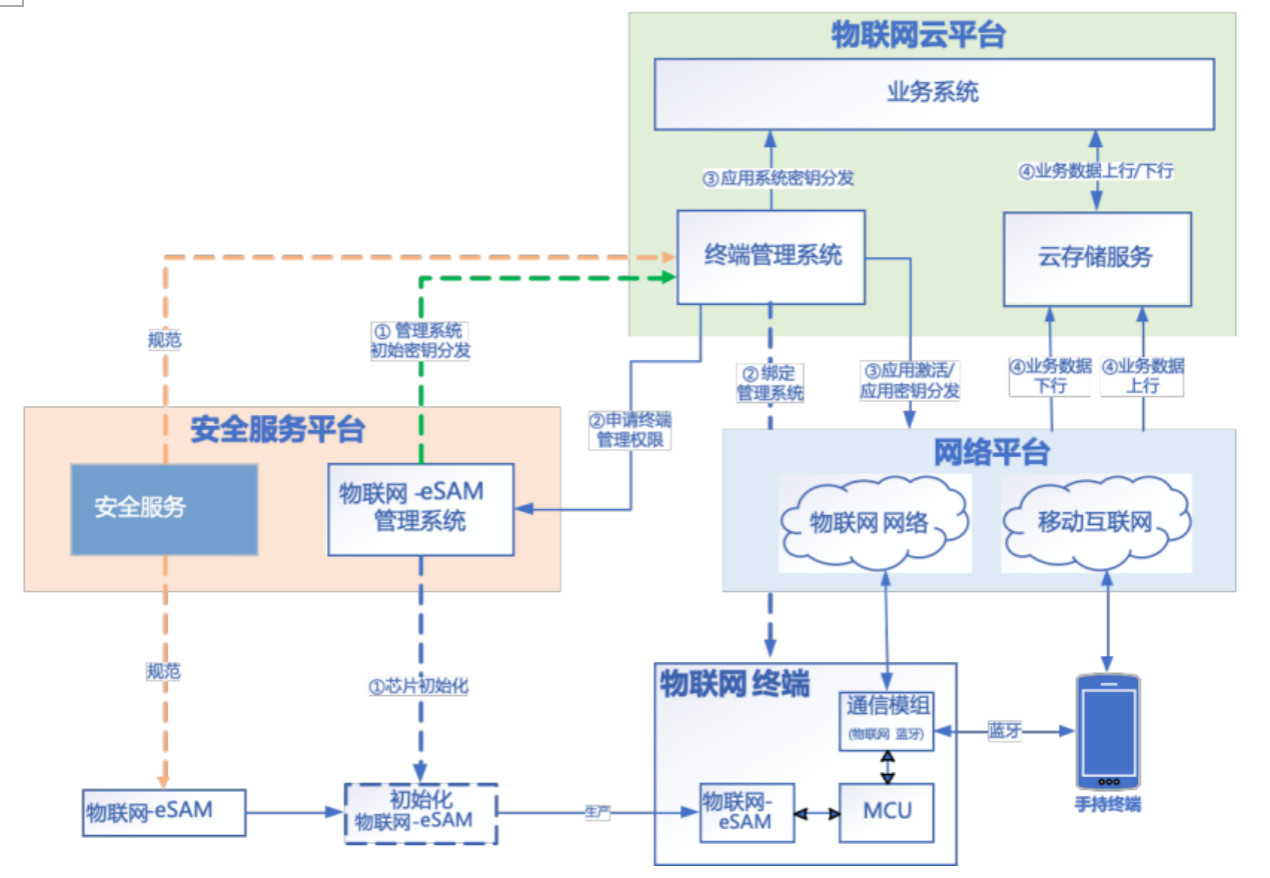
### 3.2.4 高安全协作物联技术（王骁&程迟）

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安全风险，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，举例概括，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和风险性；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；设备部署的随意性，设备使用周期差别较大，设备更新管理难度大。

物联网网络安全风险主要集中在：

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。

针对以上问题，高安全协作物联网技术是在协作物联网通信管理的基础上，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。



### 3.2.5 协作智能行为模型（程迟&王骁）

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工作，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，然后使断路器动作。

另外，智能断路器除了保护作用外，还有更一般的控制作用，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，通常是回路检测、机械特性检测、接触电阻检测等检测指标，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、工作效率低的特点。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， 使用检测数据的效果十分受限。

基于协作物联和协作智能的系统检测预测系统，旨在利用协作物联的数据共享能力，和协作智能的数据处理算法，实现断路器的自动化和智能化，尤其为断路器的赋能，实现高效的边缘异常检测和预测能力。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，在本地实现本地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时间、空间层面更加丰富的数据。协作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，通过结合电力场景的算法设计与优化、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。

### 3.2.6 工业高可靠芯片设计加固技术（邵博士）

### 3.2.7 高精度AD转化电路IP（邵博士）

## 3.3 拟解决关键难点问题

### 3.3.1 高可靠性（邵博士）

### 3.3.2 HPLC通信芯片 （张朝霞）

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。

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）优化的网络拓扑结构：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 协作物联 （程迟&王骁）

协作物联网技术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，协作物联网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，基于协作物联网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。

### 3.3.4 智能断路器的工作状态识别和自适应调整（协作智能，程迟&王骁）

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而自动调整相关参数，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（过电压，过电流，漏电流和电弧；电流类型：短路电流、过载电流、小电容电流和小电感电流），识别其类型，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，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的误报。

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（协作智能，程迟&王骁）

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。

通过对协作物联网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，涉及针对不同类传感器的大量并行处理。之后使用不同的机器学习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。

### 3.3.6 边缘侧硬件快速计算与响应实时性问题（协作智能，程迟&王骁）

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”。推断和训练相比有其特殊性，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，很多开创性的神经网络架构不断出现，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。

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。利用这样的稀疏性特性，再有就是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。

系统能够支持对数据处理方法算法进行远程升级，也决定这断路器解决方案的灵活性。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（邵博士）



图2 Clock方案设计

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。

### 3.4.2 低功耗方案设计（邵博士）

片内模块对全片电源域以及电源开关进行全局性控制。

在功耗控制方面，芯片采用时钟分频器、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。

所有的低功耗策略都通过CPF格式进行全流程管理。

### 3.4.3 基于协作物联的协同数据管理（程迟&王骁）

协作物联网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 断路器节点间数据共享策略

使用自研的节点相识相知算法，是协作物联的核心通信管理方式。点间相知相识机制nSIIC (Nodes’Sense, Identification and Inter-Collaboration, nSIIC)，该算法主要包括三个流程，环境节点探测、身份信息识别、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，各个节点利用“名片文件”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，系统缓存的名片文件会随之更新，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策略，是数据共享策略的核心，也是对以基于请求的消息推送策略为基础的系统的增广。相比与基于请求的消息推送策略，基于统计信息的策略是一种主动提供消息推送的策略。具体而言，对于网络中的某个具体节点而言，基于数据生产者的角度，节点通过自身所配置的传感器感知环境数据，是数据的提供者，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。

统计信息的消息预取及推送策略，首先根据消息预取及推送的历史记录计算节点间的需求关联度和服务关联度。当节点向网络中某服务方节点发出数据请求后，通过分析网络服务方节点关联度，也会向网络中与该服务方节点关联度较高的其它服务方节点发出数据请求。同理，当节点收到网络中某需求方节点发来的数据请求后，通过分析网络需求方节点关联度，向从而选择相似度高的消息请求，预取出来，让网络节点可以将一部分数据和指令提前获取，当后续任务执行过程中产生真正的数据或指令需求时既可直接使用，降低任务处理耗时，提高工作效率。

3.4.3.2 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：名片文件和断路器指标数据。

在协作物联的信息交换过程中，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，“名片文件”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。

存储的名片文件，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。其内涵为用于实现节点间相识和可互操作的数据信息集合，包括节点的源地址、目的地址、校验位、数据包长度、节点设备类别等信息，即节点的身份页；而外延为节点常用功能，包括节点本身支持的功能列表及对应的控制编码、物理量及赋值范围、感知数据列表及数值范围。通常情况下可将常用的物联网设备按照类别分组，然后确定每组的常用功能及对应指令。为每个设备提供的指令编码包括mesh类网络通信指令码、basic\_func类设备功能指令码、device类设备自身状态指令码三类。每个节点接收来自其他节点的名片文件，也向其他节点发送自身的名片文件。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名片文件所包含的节点身份信息，每当收到新的报文时，按照表中的名片文件对报文进行解析，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。

基于统计信息的消息预取及推送策略中，据此可建立网络节点关联度列表，通过分析过去一段时间内网络各节点的历史消息推送记录，计算节点之间的关联度列表。当节点向网络中某服务方节点发出数据请求后，通过分析网络服务方节点关联度，也会向网络中与该服务方节点关联度较高的其它服务方节点发出数据请求。同理，当节点收到网络中某需求方节点发来的数据请求后，通过分析网络需求方节点关联度，向从而选择相似度高的消息请求，预取出来，实现消息的预取推送。

所以，基于统计信息的消息预取及推送策略不仅是数据管理策略，也是通信唤醒策略，能够降低通信开销，较小系统功耗。

### 3.4.4 基于协作智能的技术方案（程迟&王骁）

为了减少定期检修的维护成本，提高突发故障与时间应对速度，设计了收集设备与其他设备的大量数据、使用这些数据进行自动化的设备状态检测预测方法，形成了基于协作物联和协作智能的系统检测预测技术方案。

（一）基于环境参数时间序列的智能断路器故障识别方法

提出一种自适应深度神经网络进行故障概率预测的方法。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[3]来区分恶性电流测量的正常值，训练得到深度神经网络。

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[4]

（三）协作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（程迟&王骁）

## 3.5 创新点 （程迟&王骁）

### 3.5.1 基于协作物联的电力网断路器数据管理方法

适应电力网断路器功能的节点数据共享策略、存储策略和设备唤醒策略，满足高性能与低功耗需求。

### 3.5.2 智能断路器的工作状态识别和自适应调整

在未提高传感器精度的条件下，尽量降低系统功耗，提出了多种断路器智能工作状态识别与自适应调整的方法。

### 3.5.3 智能断路器的健康监测和预测性维护

帮助提高了断路器健康检测的智能性，降低运维成本。

### 3.5.4 边缘侧硬件快速计算与响应实时性问题

结合电力网任务，构建了高效能的软硬件处理协同加速，提高了实时性。

### 3.5.5 适应电力网断路器环境的边缘计算

对机器学习和神经网络任务在边缘测的实现，进行了适应电力网断路器任务的优化，并设计了低功耗高性能神经网络计算单元，构建了支持升级的数据处理方法算法模型。