

基于CSS定位技术的变电站多模式高精度定位方法研究与应用

针对现有定位技术在变电站应用中的不足,本文提出一种基于CSS定位技术的多模式高精度定位方法。首先对几种主流定位技术和变电站环境特点进行了分析,在此基础上介绍了CSS定位和区域位置指纹定位相结合的定位过程和硬件实现,通过在某智能变电站的实际应用测试,验证了该方法的可行性。

高强 全杰 苏斓 崔世界 尚志军 李丹 张庚/中国电力科学研究院

0 引言

随着变电站自动化水平的不断提高以及定位技术的飞速发展和成熟,变电站对于人员和物品精确定位的需求日益迫切。现在国内的绝大多数变电站都没有针对站内工作人员和工器具的有效监管系统,经常会出现人员离岗或发生事故不能及时救援、工具找寻困难或丢失的问题。实时精确的定位技术不仅能够对工作人员进行巡视跟踪、行为监控从而实现工作人员的有效监管和事故预警,考察巡检人员的值守情况,杜绝违规操作等,还可以对变电站的工器具进行科学有效的管理,解决长期以来变电站的工器具依赖手工管理的问题,实现工器具快速定位,为变电站的工器具管

理提供自动化的监测手段,提高工作效率。因此,采用先进的定位技术实现变电站范围内人员和物品的高精度实时定位势在必行。

1 变电站环境下的定位技术分析 & 选择

1.1 定位技术对比分析

目前,定位技术由于越来越多的市场需求而被广泛关注,国内外相关研究机构开展了大量的研究,涌现出很多先进的定位技术,根据室内和室外不同的定位环境,大致可以分为室内定位技术和室外定位技术两种。室外定位主要有GPS、基站定位等,对于室外环境,GPS是一种成熟的无线定位技术,已在很多行业得到了广泛的应用;基站定位一般应用在手机定位中,误差较大,这两种定位技术由于在室内环境中不能提供精确的定位保障而一般无法应用。但是往往在人们活动最为频繁的室内环境中实现定位需求更大,为此,人们探索出很多室内定位技术,主要有WiFi技术、蓝牙技术、超宽带(UWB)技术、线性调频扩频(CSS)技术、射频识别定位技术(RFID)、ZigBee为代表的无线传感器网络(WSN)定位技术、红外线定位技术以及超声波定位技术等等,如图1所示。

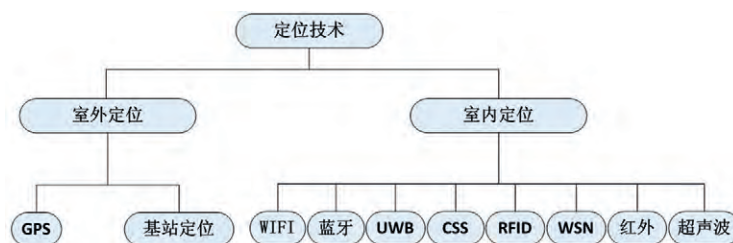
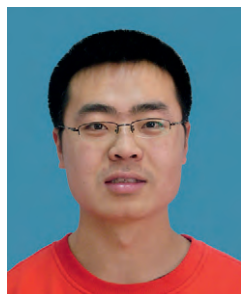


图1 定位技术分类



高强/助理工程师

关键词/Keywords

变电站定位·
CSS定位·
多模式·
区域指纹定位·

红外线定位技术和超声波定位技术由于其部署复杂度高、造价昂贵的缺点，在实际应用中没有得到广泛地推广，而射频定位技术则依靠自身定位精确度高、造价较低和部署相对较容易等优点，使基于此技术的定位产品更有应用前景。这

些定位技术各有特点，见下表。需要说明的是，定位精度与系统部署和覆盖范围有着密切的关系，表中所列精度均是在一般应用情况下能够达到的精度范围。

表 几种主要定位技术比较

定位技术	定位精度/m	成本	功耗	覆盖范围	优点	缺点
GPS	10~20	较高	高	广	技术成熟、应用广	不适用障碍物多场合或者室内定位
WIFI	3~50	高	高	50~100 m	易安装,布局简单	成本高、稳定性差
蓝牙	2~10	较高	低	10~15 m	功耗低、易集成	距离短、稳定性差、易受噪声干扰
UWB	0.30~0.8	高	低	3~5 m	精度高、功耗低	成本高
CSS	1~3	低	低	100 m(可扩展)	精度高、成本低	硬件性能要求高
RFID	3~5	低	低	1~10 m	成本低、体积小	距离短,不具备通信能力,与其他系统集成不便
ZigBee	3~5	低	低	10~20 m	功耗低、成本低	稳定性低、易受环境干扰

1.2 变电站环境下的定位技术选择

与一般定位应用相比，变电站定位由于其环境的特殊性，存在以下技术难点。

1.应用环境复杂

变电站定位环境通常会有各种阻碍信号传输的障碍物，比如墙体、电力设备、电缆等。障碍物位置各异，布局各不相同，大量的不确定性造成无线信号传输环境异常复杂，定位信号难以持续获得，容易形成定位孤岛现象。

2.干扰源多

由于变电站环境相对封闭，电磁场、光线和温度等干扰源都会对定位设备的传感器造成一定的影响，无线信号的强度的变化不再与位置成明显的对应关系，因此，基于信号强度（RSSI）的定位方法无法保证精度。

3.定位部署和成本要求严格

为保证变电站安全可靠运行，定位系统的部署不能复杂，且对成本有着严格的限制。

4.定位应用复杂多样

变电站内对定位技术的应用主要是人员和物品的精确定位，具有多定位体同时定位、移动定位和实时跟踪定位轨迹等特点，这就对定位系统的功耗、精度、实时性、连续性、稳定性和可集

成性提出了较高的要求。

通过上述分析可知，对于本文提出的几种主要定位技术，若用于变电站定位，均存在一定的问题，或是精度不高以至于不能正确判断人员和物品的精确位置导致判断失误，或是成本太高以至于不能够广泛普及应用。因此，本文针对变电站的应用环境，提出一种以CSS定位技术为主，以变电站现有通信网络和设备为辅助定位手段的低成本高精度定位方法，即基于CSS定位技术的多模式高精度定位方法。

智能变电站的发展使得无线通信技术在变电站自动化系统中应用成为现实且得到不断推广，一些智能变电站的在线监测和辅控系统利用WIA、ZigBee等无线传感器网络（WSN）技术和WIFI技术已经实现全无线结构，这些无线通信技术的应用将为变电站定位技术提供有力的帮助。

2 CSS定位技术简介

线性调频扩频（Chirp Spread Spectrum，CSS）是以 IEEE 802.15.4a 协议为基础开发的无线通信技术，采用脉冲压缩处理机制使得接收脉冲能量非常集中，极易被检测出来，接收端通过匹配滤波处理后获得被压缩输出的尖峰脉冲，从而

在接收端可以准确地获取信号的到达时间。CSS定位技术一般采用基于TOA的对称双边双向（SDS-TWR）测距方法获取双向传输的时间，进而获取节点距离，测距原理如图2所示。首先标签向基站发送测试信号，并启动定时器，基站收到测试后，启动自己的定时器，同时由硬件自动返回一个应答信号，同时停止定时器，读取处理时延 T_1 ，标签收到硬件应答信号后停止定时器，读取信号往返时延 T_2 ，同理，由基站发送测试信号开始，重复一次上述的测距过程，标签和基站分别读取处理时延 T_3 和信号往返时延 T_4 。

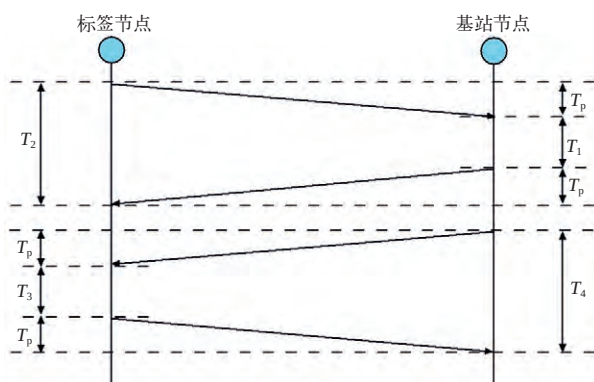


图2 SDS-TWR测距流程图

可以看出，在上述测距过程中，标签和基站进行了两次对称的测距过程，每次测距过程包含了一次信号往返所用的时间，从而可以得出标签到基站的传输时间

$$T_p = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{4} \quad (1)$$

将光速表示为 c ，则标签点到基站之间的距离为

$$d = T_p c = \frac{(T_2 - T_1) + (T_4 - T_3)}{4} c \quad (2)$$

SDS-TWR测距方法不需要定位标签与基站之间进行时间同步，系统实现简单，且能够有效地降低因硬件时钟频偏造成的测量误差。

CSS定位技术具有抗干扰能力强、多径分辨能力强、受频率偏移影响小、功耗低和成本低等优点，相比于其他定位技术更适于变电站应用。

3 多模式融合定位

虽然CSS定位技术在变电站应用中具有其他定位技术无法比拟的优势，但是由于变电站环境复

杂，障碍物较多，采用单一的基于时间测量的CSS定位技术在非视距传播(NLOS)区域误差较大，甚至由于遮挡严重导致获取不到3个以上基站，无法通过三边法实现定位，出现定位孤岛的现象。

变电站内WSN和WIFI节点的部署是固定不变的，且一般分布在电力设备附近，即在CSS定位效果不理想地带往往WSN或WIFI节点分布比较密集，这一场景特点使得可以借助小区域内的位置指纹定位技术来弥补CSS定位的不足，保证定位精度和连续性。

基于CSS定位技术的变电站多模式融合定位方法分为离线训练阶段和在线定位阶段。

3.1 离线训练阶段

与传统位置指纹定位的离线训练不同，本方法首先需要采用CSS定位技术对变电站进行定位区域的划分，然后在所划分的各个区域内进行位置指纹采集，具体过程如图3所示。

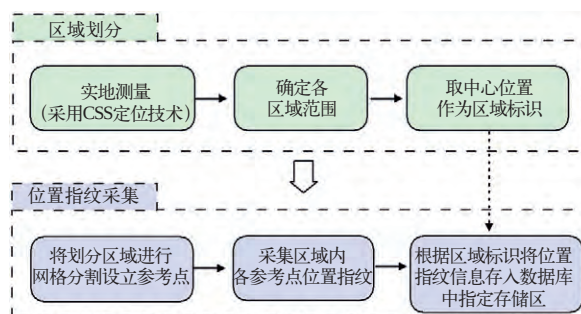


图3 离线训练流程图

1. 区域划分

首先根据变电站占地面积、定位精度以及成本和部署要求安装CSS定位基站，然后采用CSS定位技术开展实地测量，一般情况下，变电站大部分区域都可以直接完成定位，只有在少数障碍物密集的小区域内达不到理想效果，所以在训练开始之前，根据变电站环境和重点活动区域分布情况进行初步范围划分，将有效提高区域划分的工作效率。当然，在变电站面积较小或者对劳动强度要求不高的情况下，应尽量实现全区域测量，减少定位死角。测量时，将测量结果与实际位置进行比较，当误差大于容忍值或者测量无法完成（获取不到3个以上基站）时，记录该处位置，并在附近区域采用同样的方法进行多次测量，从而获得该区域的最终范围。区域范围确定后，需要将中心位置作为该定位区域的标识并保存。

2. 位置指纹采集

将已划分的定位区域进行等距离网格分割，每个网格的交点处设立参考点，在每个参考点位置采集附近WSN节点和WIFI节点的信号强度值，同一参考点经过多次采集，取均值，并剔除其中波动大的信号节点，组成向量{SSi1, SSi2, ..., SSiN, SFi1, SFi2, ..., SFiM}，向量中SS和SF分别为WSN和WIFI节点的信号强度值，i代表第i个参考点，N和M代表区域内搜寻到的WSN和WIFI节点个数，然后连同该点的位置信息一起作为一条指纹存入位置指纹数据库中，每个定位区域在位置指纹数据库中都有自己特定的存储区，且与各自的区域标识一一对应。离线训练阶段的场景示意如图4所示。

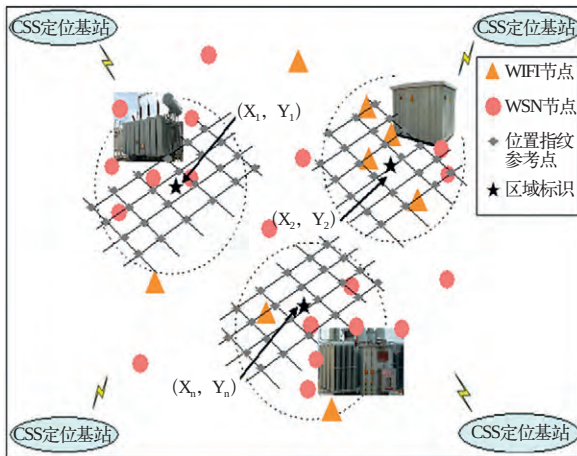


图4 离线训练场景示意图

3.2 在线定位阶段

在线定位阶段是采用CSS定位和区域位置指纹定位相结合的方法完成目标精确定位的整个过程，具体实现流程如图5所示。

定位过程开始后，首先采用CSS定位技术测量目标位置，当测量结果出现异常，则进入区域位置指纹定位过程。测量结果出现异常的判定依据是满足下列条件之一：

(1) 测量无法完成即搜索不到3个以上CSS定位基站信号；

(2) 相邻两次测量结果有较大波动，即

$$\Delta d = \sqrt{(x - x_p)^2 + (y - y_p)^2} \geq \Delta E \quad (3)$$

式中， Δd 为相邻两次测量结果的欧几里得距离； (x, y) 为当前测量位置坐标； (x_p, y_p) 为前一次测定结果； ΔE 为判定阈值，大小可由定位目标

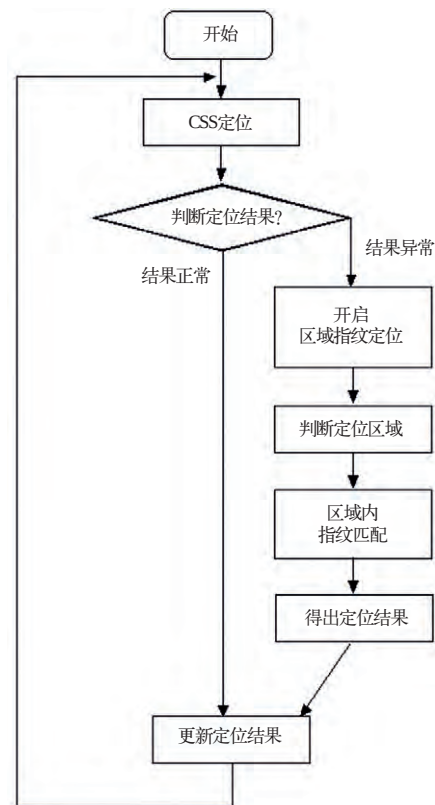


图5 在线定位流程

移动速度、定位时间间隔 Δt 和定位精度 P_r 进行估算，即

$$\Delta E |vv \times \Delta t + P_r \quad (4)$$

在CSS定位过程中，为保证定位精度和减少误判率，可采用多次测量求均值的方法确定结果，在满足实时性要求的情况下，应尽可能增大测量次数，CSS定位技术单次测量反应时间为毫秒级，可以满足绝大多数定位场合应用。

当开启区域位置指纹定位过程后，首先需要根据当前位置来判断所属区域，同样是采用欧几里得距离来计算当前位置与各个定位区域中心的远近，距离最小的即为所属定位区域，然后在该区域内通过指纹匹配计算出目标位置。

4 硬件实现

嵌入式定位模组是上述定位方法的实体体现，它可以与手持设备、可穿戴设备、安全工具和巡检机器人等集成，实现变电站人员和物品的精确定位。

嵌入式定位模组由定位引擎、CSS测距模块、

WSN和WIFI信号采集模块、定位指纹数据库、电源模块以及通信接口组成,如图6所示。

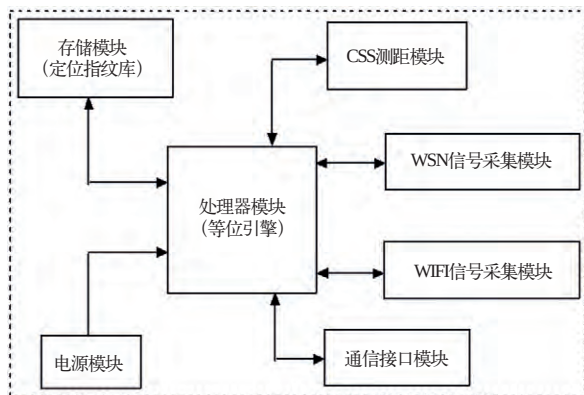


图6 嵌入式定位模组组成结构

嵌入式定位模组的核心是定位引擎,通过对外围CSS测距模块、WSN和WIFI信号采集模块的数据进行综合分析,实现离线训练阶段的区域划分和位置指纹数据库的建立,在线定位阶段的定位模式切换和区域指纹匹配,确定目标位置。

存储模块中保存着定位指纹数据库,包含划分的区域标识和对应区域内多个参考点的信号强度指纹信息。模组在电源设计上采用先进的电源管理方案,充分考虑性能和功耗的平衡,在满足性能需求和保障用户良好体验的前提下,尽可能降低终端设备的整体功耗,在结构设计上采用集成化、模块化的设计,通过标准通信接口

(UART、SPI和I2C等)可以方便的集成到各种设备当中,模组实物如图7所示。

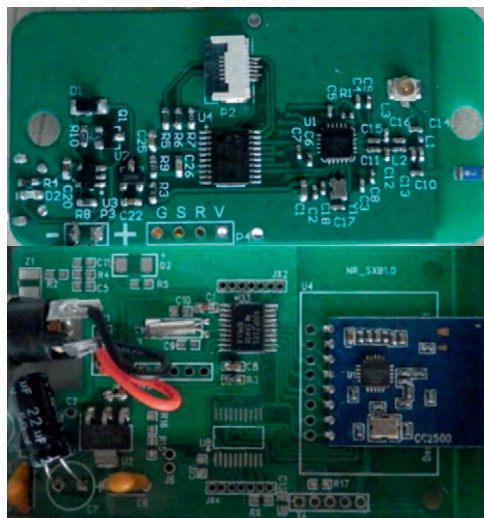


图7 嵌入式定位模组实物图

5 应用测试

为验证本文提出的定位方法,在某220 kV智能变电站进行了应用测试。该变电站在线监测系统采用全无线结构,如图8所示,系统分为三层,过程层采用WIA工业无线传感器网络通信,对HGIS开关设备和变压器进行状态监测,并将监测数据传送给间隔层的综合监测单元,综合监测单元上行通过WIFI网络与主站通信。

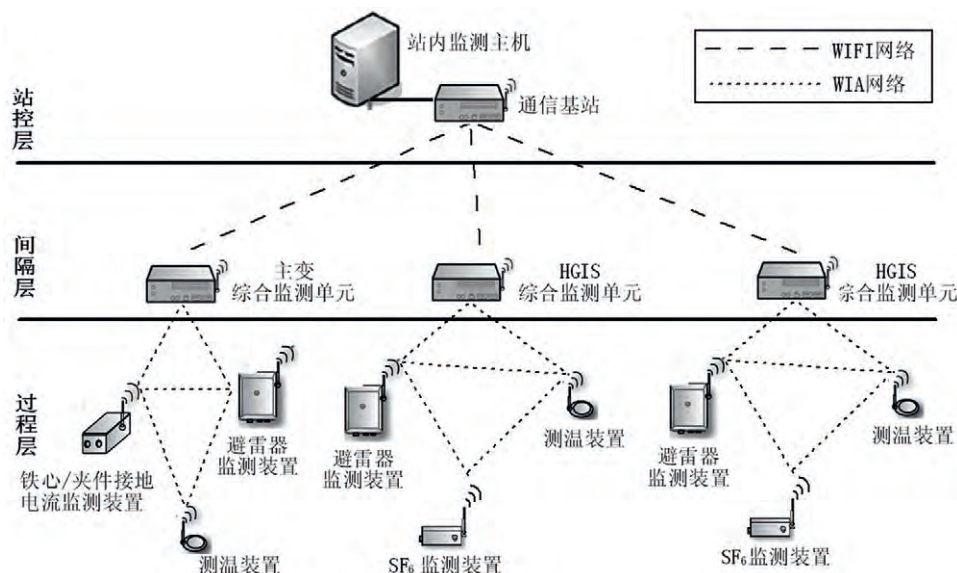


图8 全无线变电站在线监测系统结构

该变电站为高度集成的全智能型变电站，长180 m，宽120 m，主要分为由HGIS开关设备组成的HGIS间隔区和变压器设备组成的主变区，CSS定位技术的最佳应用范围在5~50 m，结合成本和基站部署的难易度综合考量，决定在变电站现场布置14个CSS定位基站，布局效果如图9所示。

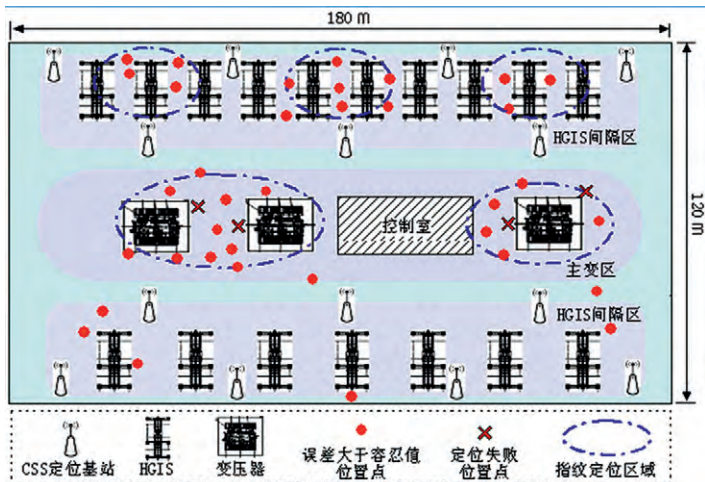


图9 变电站定位区域划分

基站设立后就可以进行离线训练，首先实验人员手持内嵌定位模组的移动终端由规划好的遍历路径对变电站进行实地测量，测量过程中，取误差容忍值为3 m，并实时记录定位失败和误差超限的位置点，测量结果如图9所示，可以看出，定位效果不理想的区域主要集中在主变区和间隔相对较近的HGIS区。

采集位置指纹时，由于所划分区域面积一般较小，区域内设立参考点的数量对定位匹配时延影响不大，所以可以根据实际情况尽量多设立参考点以提高定位精度，本应用中，每隔1 m建立一个指纹参考点。离线训练完成后，针对具有代表性的主变区及其附近区域，对定位结果进行测试验证。测试时，由于人的移动速度和测量间隔对判定阈值的影响很小，可以忽略不计，所以取等于误差容忍值3 m，通过对采集的大量数据进行分析，得出定位误差累积分布情况如图10所示。

由图10可以看出，采用CSS定位与指纹定位结合的方法能将90%的定位误差控制在3 m以内，且最大误差不超过5 m。而仅采用CSS定位的误差在3 m以内的不到70%，且误差波动范围较大。显然，采用CSS定位与指纹定位结合的方法能够有效的减

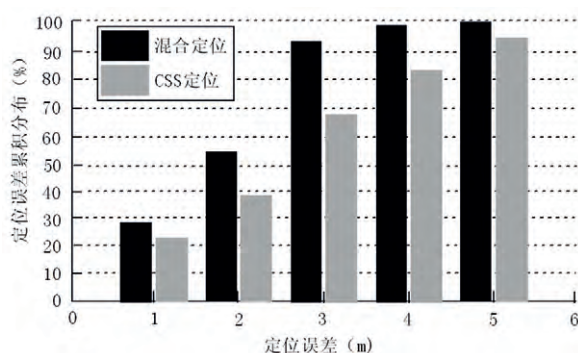


图10 定位误差对比显示

小单一CSS定位在某些区域的定位误差，从而提高了整体定位精度和稳定性。

经实际测试还可获知，在一些没有被划分的区域采用指纹定位甚至会比CSS定位精度高，所以在情况允许的条件下，可以通过比较CSS定位和指纹定位的精度，适当增加指纹定位的区域，进一步提高定位精度。

6 结束语

基于CSS定位技术的多模式定位方法通过融合变电站内固有的无线传感器网络和WIFI网络，采用CSS定位和区域位置指纹定位相结合的模式，以较低的成本和简单的部署实现变电站范围内的人员和物品的实时连续高精度定位，有效促进变电站巡检的信息化、自动化和交互化，为构建智能变电站提供有力条件。

作者简介

高强 (1986-)，男，硕士，助理工程师，研究方向为电力通信与电力时频同步技术。

全杰 (1983-)，男，博士，高级工程师，研究方向为智能传感、智能电力设备和能源互联网技术等。