2025.02
［季刊］ 总第170期
2025年6月

ISSN 1009-0940
CN 36-1115/TN

江西通信科技

JIANGXI TONGXIN KEJI

ISSN 1009-0940
9 771009 094253 06>

主管单位 江西省通信管理局
主办单位 江西通信行业职业技能鉴定中心
江西省通信学会

《江西通信科技》征稿启事

《江西通信科技》是面向全国公开发行的通信科技类刊物，创刊于1980年，具有国内统一连续出版物号（CN 36-1115/TN）和国际标准连续出版物号（ISSN 1009-0940）。现因期刊发展需要，特向广大读者征稿，欢迎从事通信技术研究的专家、学者、工程技术和企业管理人员等读者踊跃投稿。

一、征稿范围

1. 通信科研成果论文。
2. 通信新技术、新设备、新业务和通信发展新动态。
3. 通信网络规划、工程设计、施工、通信管理等方面的理论研究和经验总结。
4. 通信设备日常维护、更新改造的经验介绍。

二、征稿要求

1. 稿件请不要一稿多投，来稿不退，请作者自留底稿。
2. 投稿请写明作者真实姓名，工作单位、地址和邮编、联系电话。
3. 投稿即视为授权数字传播。
4. 根据《中华人民共和国著作权法》有关规定，凡向本刊投稿者皆被认定遵守上述约定。
5. 若作者不同意其稿件被数字传播和收录，请在来稿时向本刊说明，本刊给予处理。

三、联系方式

地　　址：江西省南昌市红谷滩区红角洲赣江南大道2698号《江西通信科技》编辑部
邮　　编：330038
联系电话：0791-83721872
电子信箱：jxtxkj@jxtxxh.cn

目次 | Contents

· 1980年创刊 ·

2025年第2期（总第170期）

江西通信科技（季刊）

2025年6月出版

主管单位

江西省通信管理局

主办单位

江西通信行业职业技能鉴定中心

江西省通信学会

编辑出版：《江西通信科技》编辑部

主　　编：钟凉楚

编　　辑：郑洪萍　钟林长

设计制作：浔阳区瑞青工作室

印　　刷：江西新华九江印刷有限公司

地　　址：江西省南昌市红谷滩区红角洲赣江南大道2698号

邮　　编：330038

电　　话：（0791）83721872

传　　真：（0791）86218179

电子信箱：jxtxkj@jxtxxh.cn

国际标准连续出版物号：ISSN 1009-0940

国内统一连续出版物号：CN 36-1115/TN

定　　价：10.00元

期刊基本参数：CN 36-1115/TN*1980*Q*16*52*zh*P*￥10.00*500*12*2025-06

1009-0940-2025（2）-1-4

通信技术在低空经济中的应用前景与挑战

曾　炜　杨　凌　郭　华　中国联合网络通信有限公司江西省分公司　江西省南昌市　330000

摘　要：低空经济作为新兴产业，正成为推动社会经济高质量发展的重要引擎。作为信息通信领域的骨干企业，中国联通依托5G/5G-A、北斗高精度定位、毫米波通信等核心技术，为低空经济构建了“通感算控”一体化的数字底座。本文结合中国联通在低空通信领域的实践经验，分析技术应用场景、发展前景及挑战，提出基于运营商视角的频谱管理、成本优化及安全防护策略，为低空经济规模化发展提供参考。

关键词：低空经济　通信技术　5G/5GA　北斗　毫米波雷达

0　引言

低空经济是以低空飞行活动为牵引的综合性经济形态，涵盖无人机物流、巡检、智慧城市等多个领域。随着5G/5G-A、北斗高精度定位等通信技术的快速发展，低空经济迎来前所未有的发展机遇。通信技术在低空经济中的应用不仅提升了无人机的运行效率，还为低空飞行器的可视、可管、可控提供技术保障。然而，低空经济的快速发展也对通信技术提出了更高的要求，包括频谱资源管理、高可靠性通信、低成本部署等。下面将从技术应用、前景展望和挑战分析三个方面展开讨论。

1　通信技术在低空经济中的应用

1.1　5G/5G-A技术的通感一体化应用

5G-A作为第五代移动通信技术的演进版本，通过通感一体化架构设计实现了通信与感知功能的深度融合，其核心技术突破体现在硬件架构与信号传输的双重优化。在硬件层面，通过共享射频前端与基带处理单元，实现通信与感知设备的高度集成。在信号层面，采用多波形时隙动态配置技术，基于7D3U（7个下行时隙+3个上行时隙）双周期帧结构，在4.9GHz频段部署连续波（C波）与脉冲波（P波）混合时隙分配方案，使下行感知资源开销控制在20%以内，同时确保低空域无缝覆盖。通过链路预算模型量化分析，当感知覆盖半径为200m时，回波信号信噪比（SNR）可达16.27dB，对应的水平与垂直定位精度分别为1.73m与1.43m。在应用层面，5G-A技术显著提升了低空飞行器的作业能力。无人机物流场景中，依托高可靠通信链路（时延<10ms）与实时高清视频回传功能（带宽≥100Mbit/s），实现复杂城市场景下的动态路径规划。电力设施巡检中，其目标检测与成像技术可将故障定位效率提升60%以上，同时降低人工干预频次。如图1所示。

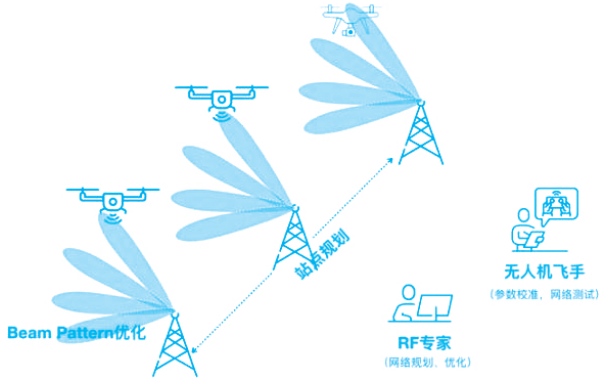

图1　5G-A低空飞行器

中国联通在深圳市低空经济示范区部署5G-A通感一体化网络，创新采用7D3U双周期帧结构，将下行感知开销控制在20%以内。通过自研低空通信模组，无人机实时回传速率达150Mbit/s，端到端时延稳定在8ms以

下，支撑某物流企业实现300架无人机集群的精细化管控。在电力巡检场景，结合联通边缘云平台，故障识别效率提升65%，人工干预频次下降40%。

1.2 北斗高精度定位技术的低空导航优化

北斗卫星导航系统通过多源融合定位算法与地基增强系统（GBAS），为低空飞行器提供厘米级定位服务。其技术核心在于伪距测量与载波相位测量的联合解算，利用L1频段载波相位波长（19cm）特性，结合广域差分技术消除电离层与对流层延迟误差，使水平定位精度提升至2cm（1σ置信区间）。GBAS通过地面基准站网络实时生成定位修正参数，并借助低空专用通信链路传输至飞行器，显著增强了复杂环境（如城市峡谷、电磁干扰区）下的定位稳定性。实际应用表明，在无人机物流领域，北斗-GBAS可将障碍物规避成功率提高至99.2%，并通过路径优化算法降低能耗18%。在智慧城市巡检场景中，无人机可依托北斗高精度定位实现亚米级轨迹跟踪，结合实时地理围栏技术，有效避免禁飞区误入风险。此外，北斗卫星导航系统通过星基增强服务（SBAS）扩展了偏远地区的覆盖能力，为低空经济的全域化发展提供了技术基础。如图2所示。

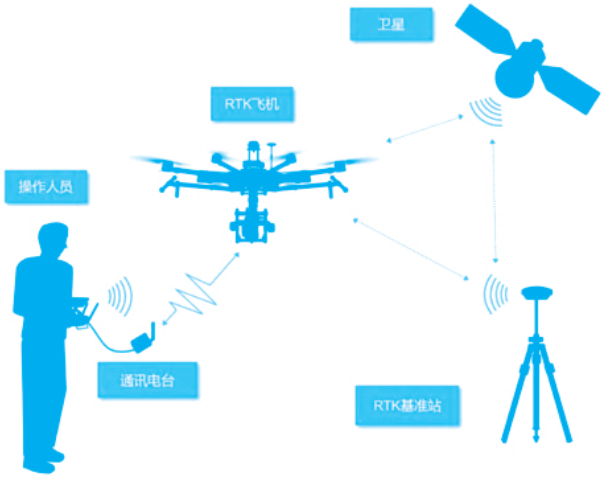

图2 北斗高精度定位技术在无人机中的应用

中国联通联合北斗三号系统，构建“星地融合”定位体系，通过GBAS与5G空口差分数据传输技术，实现无人机厘米级定位（水平精度2cm，1σ置信区间）。在雄安新区无人机配送项目中，依托联通定制化北斗通信模组，障碍物规避成功率达99.3%，路径规划能耗降低20%。针对偏远地区，通过北斗卫星短报文与5G网络无缝切换，保障全域无死角覆盖，支撑低空经济向县域及农村地区延伸。

1.3 毫米波通信与感知融合技术

毫米波频段（28GHz/39GHz）凭借超大带宽（连续频谱≥2GHz）与波束成形技术，成为低空经济中高速数据传输与高精度感知的关键支撑。其技术优势体现在两方面：首先，通过大规模MIMO（256阵元天线阵列）与窄波束成形（半功率角≤3°），实现空间复用与干扰抑制，频谱效率较Sub-6GHz频段提升5倍以上；其次，采用调频连续波（FMCW）雷达模式，同步完成目标速度测量（精度0.1m/s）与通信数据传输（速率≥5Gbit/s），突破传统分置式系统的资源竞争瓶颈。在油气管道巡检场景中，毫米波系统可检测0.5mm级裂缝并实时回传4K视频流（端到端时延<10ms），巡检效率较传统方案提升4倍。在密集城市空域，其高分辨率点云成像能力可精准识别楼宇间隙与动态障碍物，为无人机提供三维避障导航支持。然而，毫米波信号受雨衰影响显著（28GHz频段雨衰达0.3dB/km），需通过智能反射表面（IRS）与多跳中继技术增强链路鲁棒性，以保障复杂气象条件下的服务连续性。如图3所示。

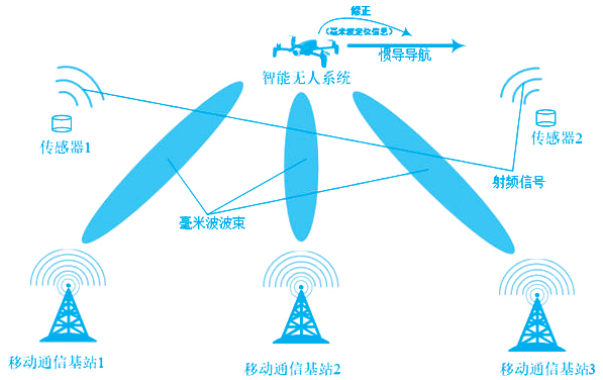

图3 毫米波一体化无人机导航系统

中国联通在3.5GHz/28GHz频段开展毫米波通信感知一体化试验，通过256阵元Massive MIMO天线实现窄波束精准覆盖（半功率角≤2.5°），频谱效率较Sub-6GHz提升6倍。在某石化园区巡检场景，部署的毫米波雷达通信一体化设备可检测0.3mm级管道裂缝，同时支持8K视频实时回传（时延<8ms），巡检效率较传统方案

提升5倍。针对雨衰问题，联合华为研发智能反射表面辅助组网技术，在中雨环境下链路可靠性提升35%。

2 通信技术在低空经济中的前景分析

2.1 市场规模增长

低空经济作为战略性新兴产业，其市场规模正经历爆发式增长。根据赛迪研究院预测，到2025年，中国民用无人机产业规模将突破2000亿元，年复合增长率达30.5%。这一增长不仅源于无人机应用的扩展，更得益于低空经济整体的快速崛起。2023年中国低空经济规模已达5059.5亿元，预计到2026年将超过1万亿元，涵盖物流配送、农业植保、城市空中交通等多元化场景。

通信技术作为低空经济的核心基础设施，其市场空间直接受益于行业扩张。以5G/5G-A基站、卫星通信芯片及毫米波设备为例，其需求随无人机数量增长而激增。例如，中国移动、中国电信等运营商已在全国部署通感一体化基站，支持无人机实时监控与数据传输，仅中国电信在深圳市的5G-A低空通感网即实现了物流、安防等多场景验证。此外，卫星通信芯片市场规模因低轨星座（如Starlink）的发展迅速扩大，预计未来五年相关芯片需求增速将超40%。

作为低空经济基础设施核心提供者，中国联通已在全国20个城市完成低空通信专网试点，支撑超20万架次无人机安全飞行。据赛迪研究院与联通研究院联合预测，2025年中国民用无人机产业规模将突破2000亿元，其中，联通低空通信解决方案渗透率预计达35%。在低轨卫星通信领域，联通参与“千帆星座”等项目建设，预计2026年卫星通信芯片及模组出货量年增速超45%。

2.2 技术创新与演进

技术创新是驱动低空经济高质量发展的核心动力。当前，5G-A通过通感一体化设计，将通信与感知功能深度融合，显著提升了低空飞行器的定位精度（水平精度1.73m，垂直精度1.43m）和实时数据传输能力。未来，6G技术将进一步突破，其超高频段（如太赫兹）和智能超表面（RIS）技术可支持更广覆盖与更高容量，满足无人机集群协同控制、超高清视频回传等需求。

毫米波技术（28GHz/39GHz频段）凭借高带宽（2GHz连续频谱）和波束成形能力，在无人机巡检、城市安防等场景中展现优势。例如，毫米波雷达可实现0.5mm级裂缝检测，同时支持Gbit/s级数据传输，效率较传统方案提升4倍。此外，自由空间光通信（FSO）作为新兴技术，通过光波传输数据，兼具高速率（Tbit/s级）和抗电磁干扰特性，尤其适用于复杂地形下的低空网络补充覆盖。

值得注意的是，技术挑战仍存在。例如，毫米波信号受雨衰影响显著（28GHz频段雨衰达0.3dB/km），需结合智能反射表面增强链路稳定性，FSO则需解决恶劣天气下的信号衰减问题。

2.3 商业模式创新

低空经济的商业化需构建“通信—导航—感知—计算”一体化的生态系统。运营商正通过多模式协同探索商业新路径：

（1）天地协同网络：自研“空天通”融合终端，支持5G基站与低轨卫星无缝切换，在青海无人区实现无人机超视距（100km+）作业。

（2）边缘智能服务：在5GMEC基站部署轻量化AI模型，实现无人机点云数据实时处理（时延<5ms），赋能某港口无人机自动理货系统，作业效率提升30%。

（3）频谱共享模式：参与工业和信息化部3.5GHz-4.2GHz频段试点，通过智能频谱调度系统，使深圳市低空示范区频谱利用率提升40%，无人机同频干扰率降至8%以下。

商业模式创新还需解决成本与政策瓶颈。例如，通感一体基站成本为普通5G基站的3倍，需通过规模效应分摊投资压力。同时，低空空域管理需军地协作，试点开放300m以下非管制空域，简化审批流程。

3 通信技术在低空经济中的挑战与应对策略分析

3.1 频谱资源管理

低空经济的规模化发展对频谱资源的高效利用提出了严峻挑战。目前，无人机主要依赖2.4GHz和5.8GHz免许可频段（ISM频段），但其频谱资源容量有限，且面临Wi-Fi、蓝牙等设备的同频干扰，导致信号冲突率高达15%～20%（根据国际电信联盟实测数据）。随着低空

飞行器密度增加（如深圳市试点区域无人机日均飞行架次超5000架），频谱资源供需矛盾将进一步激化。频谱资源管理核心问题与应对策略如下：

3.1.1 动态频谱共享技术

（1）基于人工智能的动态频谱分配（AI-DSA）：通过机器学习算法实时监测频谱占用状态，动态调整无人机通信频点。例如，采用联邦学习框架，多基站协同预测频谱空闲窗口，实现干扰规避与资源利用率最大化（实验表明可提升频谱效率30%以上）。

（2）数据库驱动的共享机制：借鉴美国公民宽带无线电服务（CBRS）模式，建立低空频谱共享数据库（如工业和信息化部规划的3.7GHz-4.2GHz共享频段），授权用户（如运营商）与普通用户（无人机）分层使用频谱，优先级动态调整。

3.1.2 专用频段规划与干扰抑制

国际电信联盟已规划全球统一的低空通信频段（如5G NR n79频段4.8GHz-4.99GHz），支持通感一体化功能，可减少跨系统干扰。采用大规模MIMO与波束成形技术：通过256阵元天线阵列生成窄波束（半功率角≤3°），将信号能量定向聚焦于无人机，降低旁瓣干扰（实测干扰强度降低12dB）。

3.2 成本与效益平衡

5G/5G-A网络的部署与维护成本高昂，成为低空经济普及的关键瓶颈。据中国移动测算，单个通感一体化基站成本约为普通5G基站的3倍（约45万元/站），且低空覆盖需密集组网（站间距≤500米），导致单位面积网络投资成本增加5～8倍。成本与效益平衡核心问题与应对策略如下：

3.2.1 低成本网络部署方案

（1）基站共享与云化架构：通过多运营商基站共建共享（如中国铁塔模式），降低铁塔租赁与电力成本；采用云无线接入网（C-RAN）架构，集中化处理基带信号，减少硬件设备冗余（CAPEX降低40%）。

（2）软件定义网络（SDN）与网络切片：为无人机业务分配独立网络切片，按需调整资源分配（如带宽、时延等级），避免超量投资。例如，物流无人机可分配低时延切片（时延<10ms），而巡检无人机分配高带宽切片（速率>1Gbit/s）。

3.2.2 商业模式创新与收益优化

（1）服务分级收费模式：根据服务等级（SLA）差异化定价。例如，华为提出的“低空网络即服务（Naas）”模式，基础服务（100Mbit/s/10ms）按飞行时长计费（0.5元/分钟），高精度感知服务（厘米级定位）额外收费。

（2）跨行业价值共享：运营商与物流企业、电网公司等签订数据服务协议，将无人机采集的高清影像、传感器数据转化为增值收入。例如，南方电网通过共享电力设施巡检数据，每年降低运维成本1.2亿元。

通过“共建共享+云网融合”降低部署成本：与中国电信共建5G低空基站超10万座，单站成本较独立建设下降40%；采用C-RAN集中化架构，基带处理设备减少60%，能耗降低35%。在商业模式创新上，推出“低空通信即服务（LCaaS）”，针对物流无人机提供分级服务，基础通信套餐（100Mbit/s/10ms）收费0.4元/分钟，高精度定位+感知套餐加价50%，2023年该模式已为某电商平台降低12%的运营成本。

3.3 安全与隐私问题

低空经济涉及海量敏感数据（如无人机实时位置、巡检视频、用户隐私信息）的传输与存储，面临数据泄露、恶意劫持与非法监控等多重风险。据中国信通院统计，2023年低空通信网络攻击事件同比增长210%，其中GPS欺骗攻击占比达45%。安全与隐私核心问题与应对策略如下：

3.3.1 数据加密与隐私保护技术

（1）轻量化同态加密（LHE）：在无人机端对飞行轨迹数据加密，云端直接处理密文（如聚合统计、路径分析），避免明文传输。华为已实现基于RLWE（Ring-Learning with Errors）的同态加密方案，计算开销降低至传统方案的1/5。

（2）差分隐私（DP）机制：对无人机采集的地理空间数据添加随机噪声（$\varepsilon \leq 0.1$），确保个体隐私不可推断。例如，美团无人机在配送路径优化中采用DP算法，使攻击者无法反推用户地址（隐私泄露概率<0.1%）。

3.3.2 安全防护与监管体系

（下转第13页）

1009-0940-2025（2）-5-9

无线通信基站1588v2时钟改造方案研究

彭纪源　李　俊　李有胜　中国联合网络通信有限公司江西省分公司　江西省南昌市　330000
焦明涛　中讯邮电咨询设计院有限公司　河南省郑州市　450007

摘　要：随着无线通信技术的快速发展，对基站时钟同步精度的要求日益提高。1588v2作为一种高精度时钟同步协议，在无线通信基站中的应用具有重要意义。本文深入研究了无线通信基站1588v2时钟改造方案，详细阐述了1588v2 协议的原理、基站现有时钟系统的不足，分析了改造的必要性。通过对硬件和软件改造方案的探讨，提出了具体的实施步骤和测试方法，并对改造后的性能进行了评估。研究结果表明，1588v2时钟改造能够有效提升基站时钟同步精度，为无线通信网络的高质量运行提供有力保障。

关键词：1588v2　OTN　BBU　基站时钟同步

0　引言

在无线通信网络中，传统的无线通信基站（以下简称基站）采用基于卫星授时的时钟同步方式，如采用GPS或北斗卫星授时，虽然能提供较高的精度，但存在部署成本高、受环境限制大（如室内、地下等场景信号弱或无法接收）以及安全性等问题。随着无线通信技术的发展及外部环境的变化，基站间同步精度要求已提升至亚微秒级甚至更高，这就促使寻找更高效、灵活且精准的时钟同步解决方案。IEEE 1588v2定义了一种可以通过承载网络传递时间同步的精确时间协议（Precision Time Protocol，PTP），作为一种基于以太网的高精度时钟同步协议，能够依托现有网络基础设施实现高精度时钟同步，这一特性有效提升了时钟同步精度，同时降低了成本，还增强了系统的可靠性与灵活性，在存量BBU授时系统的改造工作中展现出了独特的应用价值。

1　1588v2协议及网络应用原理解析

1588v2 协议定义了一种主从时钟架构，网络中的设备分为主时钟（Master Clock）和从时钟（Slave Clock）。主时钟负责产生高精度的时间基准，并通过网络向从时钟发送时间同步消息。从时钟接收这些消息，并根据消息中的时间戳信息调整自身的时钟，通过主从时钟间的消息传递，计算时间和频率偏移量，最终实现主从时钟的频率和时间同步。

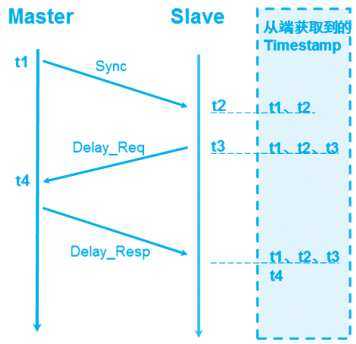

图1　1588v2主从时钟同步模型

图1描述的是1588v2延时请求响应机制的模型流程图，从该图可以清楚地描述1588v2实现时间同步的原理，根据1588v2延时请求响应机制的模型流程，假设主从时钟的时间偏差为offset，且往返路径对称、延时为delay。在t1时刻，主时钟发出携带自身发送时刻时间戳的Sync信号；t2时刻，从时钟按本地时钟记录Sync信号的接收时刻并生成对应时间戳，转化为表达式：

$$t2=t1+delay+offset \quad (1)$$

从时钟在接到Sync信号之后，根据延时请求响应机制，t3时刻，向主时钟发送延时请求信号Delay_Req，生成并携带该时刻的时间戳信息；主时钟接收到延时请求时记录下该时刻精确时标t4，并生成时间戳信息，在后续向从时钟发送的响应信号Delay_Resp

中携带t3，t4时刻的时间戳信息。t3，t4的关系表达式为：

$$t4=t3+delay-offset \quad (2)$$

根据上述两式可以计算得：

$$delay=[(t2-t1)+(t4-t3)]/2 \quad (3)$$

$$offset=[(t2-t1)-(t4-t3)]/2 \quad (4)$$

1588v2协议在网络实现中通过在数据包嵌入精确时间戳实现时钟同步，时间戳获取方式分为硬件与软件两类：硬件时间戳借助网络接口卡（NIC）硬件功能，在数据包进出接口时精准记录时间，精度较高；软件时间戳由操作系统在协议栈处理数据包时记录，精度相对较低。实际应用中，为追求更高同步精度，通常优先采用硬件时间戳。

为满足同步信息交互需求，1588v2协议定义了多种同步消息，主要包括Sync消息、Follow_Up消息、Delay_Req消息和Delay_Resp消息。Sync消息由主时钟周期性地发送给从时钟，携带主时钟的当前时间。Follow_Up消息紧随Sync消息发送，补充Sync消息中未包含的精确时间戳信息。从时钟接收到Sync和Follow_Up消息后，记录接收时间，并向主时钟发送Delay_Req消息。主时钟接收到Delay_Req消息后，回复Delay_Resp消息，携带主时钟接收到Delay_Req消息的时间。通过这些消息的交互，从时钟可以计算出与主时钟之间的时间偏差和网络延迟，从而调整自身时钟。

为适应复杂组网环境，并为从时钟设备选择跟踪主时钟提供依据，1588v2协议采用最佳主时钟算法（Best Master Clock Algorithm，BMCA）来选择网络中的主时钟。BMCA通过比较设备的时钟优先级、时钟质量、时钟标识等参数，确定网络中的最佳主时钟。每个设备在启动时都会广播自己的时钟信息，其他设备根据接收到的信息运行BMCA，选择最优的主时钟进行同步。如果当前主时钟出现故障或网络拓扑发生变化，BMCA会重新计算并选择新的主时钟，确保网络中的时钟同步不受影响。

2 基站时钟同步系统改造关键技术分析

在无线通信网络中，所有制式的基站都需要频率同步，不同基站之间的频率必须同步在一定精度之内，否则手机进行基站切换时会出现掉线。而一些采用时分双工（Time-Division Duplex，TDD）机制的无线制式，如TD-SCDMA、CDMA2000、LTE-TDD、5G NR TDD等，在频率同步之外还特别要求精确时间同步，任意两个基站之间时间同步精度小于3μs（或每个基站相对于标准时间源之间的时间误差在±1.5μs内）。此外，无线移动网络中CoMP、E-MBMS、eICIC、CA等增值业务的出现，也要求基站之间必须实现时间同步。

为满足同步需求，目前大多数基站采用的时钟系统主要基于北斗/GPS卫星授时接收机和本地时钟源。北斗/GPS卫星授时接收机通过接收卫星信号获取高精度时间基准，并将时间信息传递至基站的基带处理单元（BBU）和射频单元（RRU）。本地时钟源通常为晶体振荡器，在北斗/GPS卫星信号丢失或不可用时，为基站提供临时的时钟参考。

卫星接收机的硬件成本较高，包含天线、接收器等设备，增加了基站的建设成本。此外，对于百万级规模的基站部署，卫星授时接收机带来的成本更加不容忽视。卫星信号易受到环境因素的影响，如建筑物遮挡、室内环境、恶劣天气等，这些因素可能导致信号减弱或丢失。在这些情况下，基站的时钟同步精度会受到严重影响，甚至可能引发通信中断。

当前存量基站的卫星授时系统中GPS占比过高，而该系统由他国政府主导，存在潜在的安全隐患。例如，在特殊情况下，GPS信号可能被干扰或欺骗，使基站接收错误的时间信息，从而影响通信网络的正常运行。另外在一些特殊场景，如室内分布系统、地下停车场等，GPS信号难以覆盖，无法为基站提供时钟同步。这限制了基站在这些场景的部署灵活性。

综上所述，基站现有时钟系统在成本、环境适应性、安全性和部署灵活性等方面存在不足，迫切需要进行改进。1588v2时钟同步技术作为一种新兴的解决方案，具有成本低、环境适应性强、安全性高和部署灵活等优点，为基站时钟系统改造提供了良好的选择。

在基于1588v2时钟同步技术改造基站同步系统时，依据协议原理，通过收发双向数据时间戳计算时间偏移

值需满足链路对称条件。当前运营商传送网多为单收单发模式，若收发纤芯长度差异较大，需将双纤收发改为单纤收发并替换设备板卡，存在较高替换成本。根据BBU侧接收1588v2时钟与标准时间偏差不超过1500ns的要求，按光纤中信号传输速度4.5ns/m计算，两根纤芯累积长度差需控制在666m以内。实际现网中，收发双向纤芯因在同一光缆内且由同一光纤预制棒拉制，长度误差很小。因此，除非超长距离的链路，多数本地网的传输链路，光纤长度误差不会造成1588v2的时间偏离超过门限值。对于一些多因素造成的偏离超限，可通过对传输设备做线路不对称误差补偿来进行调整，或者在次级环路中接入小型时钟设备进行时钟同步。

3　现网1588v2时钟改造实例解析

现网实例中1588v2时钟传递路径如图2所示，市局OTN设备与时间服务器对接获取时钟信号，县局OTN设备与智网和IPRAN对接输出时钟信号，完成南昌市、赣州市、萍乡市等11个地市陆上1588v2的时钟传递。

3.1　OTN网络同步链路升级改造实例分析

本次方案采用现网普通双纤双向EOSC传递1588v2时钟信号，无须额外改造更换或调整板卡，但需对低版本EOSC进行升级以优化部分1588v2功能。改造首要任务为完成EOSC版本升级，现网升级版本及数量统计见表1。升级前需确认环网EOSC及OSPF邻居状态正常；升级时需做好备件保障，先对市区备用线路EOSC进行升级，确认单盘状态与邻居关系正常后，按“一个环一次升一块”的原则，选取远端节点先升备用线路EOSC，再升主用线路。随后沿往市局的一个方向逐点升级，待该方向全部升级完成后，再沿另一方向往市局逐点升级。整个升级过程不影响业务，但可能出现网元托管情况，升级前后需反复确认邻居关系及单盘状态正常。

表1　现网EOSC升级版本及数量统计表

地市	单盘类型	硬件版本	软件版本	目标版本	数量
赣州	EOSC_OTN	WKE2.200.215R2B	RP0104	RP0105（2023/4/23）	60
	EOSC_OTN	WKE2.200.215R2B	RP0105	RP0105（2023/4/23）	2
	EOSC_OTN	WKE2.200.215R2B	RP0105	RP0105（2023/4/23）	3

完成EOSC升级后需规划尾纤端口，并完成尾纤布放，确认对接尾纤光功率正常，现网实例中端口规划情况见表2。

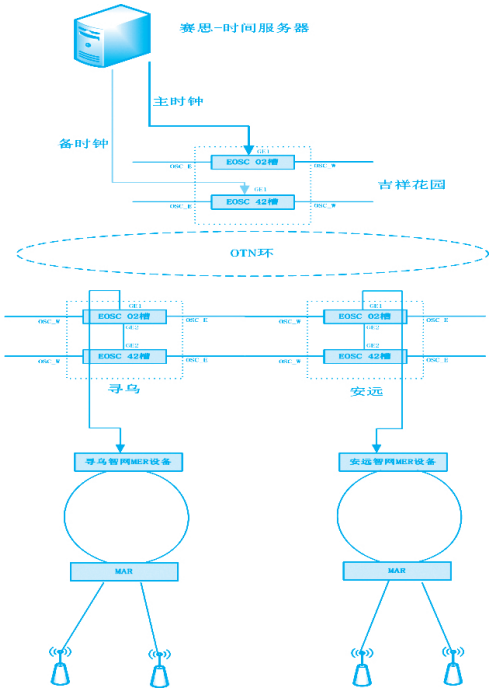

图2　现网1588v2时钟传递网络示意图

表2　现网端口规划表

地市	站点	烽火OTN端口	对端端口	
萍乡	南环国信	02-EOSC-GE1	赛思时钟（主）	GE0/8/1
萍乡	南环国信	42-EOSC-GE1	赛思时钟（备）	GE0/8/2
萍乡	南环新大楼	02-EOSC-GE2连42-EOSC-GE2	/	/
萍乡	芦溪	02-EOSC-GE1	MER端口	XGE3/0/0
萍乡	芦溪	42-EOSC-GE1	IPRAN端口	GE0/5/1
萍乡	芦溪	02-EOSC-GE2连42-EOSC-GE2	/	/

现网完成硬件升级及端口确认后，需基于网管进行时钟数据配置并确认时钟锁定正常。如图3所示，时钟配置第一步是完成同步接入端“吉祥花园”站的PTP配置：首先对EOSC盘的［时钟配置］和［PTP时间同步］进行1588v2配置，选择BMC时钟并设为BC模式；然后，时钟注入节点的市局两块EOSC与时间服务器对接的端口均配置为Slave模式以接收1588v2信号，OSC线路端口则配置为Master模式。

图3 吉祥花园站PTP同步配置示例

第二步需完成“安远中行”站OTN传输网络向IP承载网络的同步信号输出，如图4所示。首先，将县局两块EOSC与智网、IPRAN对接的端口配置为Master模式以输出时钟信号，OSC线路端口及互连端口配置为auto模式；随后查看EOSC单盘状态中的PTP基本信息，确认同步状态正常；后续可根据实际需求手动补偿线路误差。

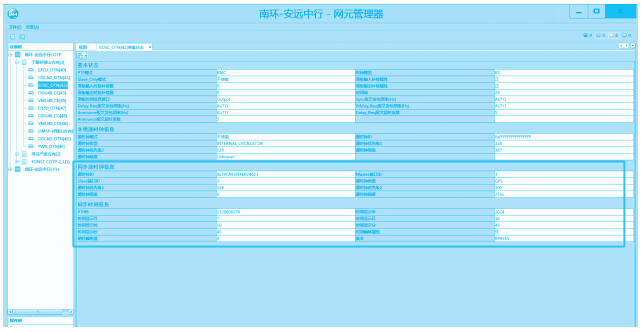

图4 安远中行站PTP同步配置示例

现网实例的线路补偿过程中，按时钟传递方向，逐点查看区（县）时间误差，相差大的进行逐段补偿。基于上述配置过程，上犹站通过吉祥花园一上犹主用光缆获取1588v2信号，通过基站侧1588v2时间数据分析上犹站EOSC盘端口输出时间偏移量，并补偿线路不对称误差，确保误差<10ns。崇义站通过上犹一崇义主用光缆获取1588v2信号，通过基站侧1588v2时间数据分析崇义站EOSC盘端口输出时间偏移量，并补偿线路不对称误差，确保误差<10ns。备用链路同理，可完成逐点传递和线路补偿，如图5所示。

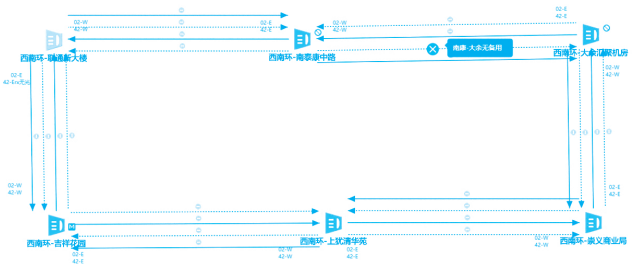

图5 地面链路同步线路补偿参考拓扑

3.2 无线侧基站1588v2配置实例分析

在承载侧完成1588v2链路配置后，需在基站侧配置1588v2使其生效，以实现同步信息接入及地面链路同步跟踪。为保障基站业务在配置阶段正常运行及紧急状态下快速恢复，操作前需进行站点备份与告警备份。具体配置步骤如下：首先执行LSTIPCLKLINK命令，查询站点是否已配置1588v2时钟。若未配置，需完成1588v2时钟添加，可通过命令行输入参数或在配置管理界面操作，参数配置时参考如下命令数据：ADDIP-CLKLINK：LN=0，ICPT=PTP，SRN=0，SN=6，CNM=L2_MULTICAST，DM=24，DELAYTYPE=E2E，MAC-MODE=NO，PROFILETYPE=G.8275.1，CSSPSW=ON，PTPVLANMODE=HYBRID。

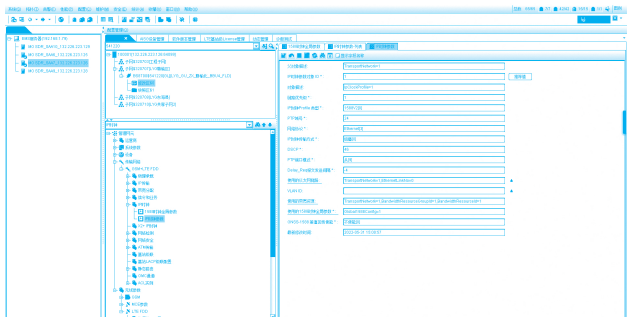

图6 基站侧1588v2配置示例

完成时钟添加后，通过网管查询确认时钟激活和可用状态，同时可以查询相位差并通过相位差初步判断链路的可用程度。如图7所示。

4 同步地面链路传递过程中的性能监测和故障定位

对于已完成配置并进入工作状态的同步地面链路，需从精度、稳定性和安全性三方面持续开展性能监测评估。经不同环境条件及网络负载测试验证，1588v2时钟

图7 基站侧1588v2配置完成后的时钟状态示例

改造后基站与主时钟的偏差可控制在亚微秒级，满足5G等新一代无线通信技术的高精度同步需求。在连续运行数天至数月的监测中，时钟偏差波动幅度较小，表明系统具备较高稳定性。此外，1588v2无须依赖卫星信号，可规避GPS系统面临的信号干扰、欺骗等安全风险，加之网络层面可通过加密、认证等机制保障同步消息传输安全，防止恶意攻击导致时钟同步异常。因此，1588v2时钟改造后基站的安全性得到了有效增强。

运行中需实时监测告警，以实现故障预判与定位。对于网络级告警，先查看产生告警设备的当前同步跟踪路径，再查询路径上其他设备节点是否存在同步告警或链路失效告警。若存在，跟踪路径最上游节点的同步告警为根源告警；若不存在，该设备告警即为分析结果。若网络级告警为时钟同步告警，仅在设备当前时钟同步跟踪路径上查询时钟同步告警；若为时间同步告警，则在时钟与时间同步跟踪路径上同时查询两类告警。

在长期运行维护过程中从成本角度分析，1588v2时钟改造方案相比传统的GPS时钟系统，在硬件设备采购成本方面有了明显降低。在维护成本方面，由于1588v2时钟同步系统利用现有的网络基础设施，无须像GPS系统那样进行定期的卫星信号监测和天线维护等工作，维护成本也相应降低。

5 结束语

本文对基站1588v2时钟改造方案进行了深入研究。通过分析1588v2协议原理以及基站现有时钟系统的不足，提出了具体的硬件和软件改造方案，并详细阐述了实施步骤和测试方法。性能评估表明，1588v2时钟改造能够显著提升基站的时钟同步精度和稳定性，降低成本，增强安全性与部署灵活性。

参考文献

[1] 刘欣,张贺.基于省际OTN层面的1588v2时间同步技术应用初探[J].邮电设计技术,2014(2):231-28.

[2] IEEE.IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems:IEEE Std 1588-2008[S].New York:IEEE,2008.

[3] EIDSON J C.Measurement,Control,and Communication Using IEEE 1588[M].London:Springer,2006.

[4] 崔永俊,韩一德,郭峰.基于IEEE1588协议的高精度时钟同步系统设计与实现[J].仪表技术与传感器,2021(12):97-101.

[5] 柳成林,路明.5G基站时钟改造建设方案分析[J].电脑与电信,2024(5):841-87.

[6] 中华人民共和国工业和信息化部.时间同步网工程设计规范:YD/T 5240—2018[S].北京:北京邮电大学出版社,2018.

[7] 中国联通.中国联通同步网网络技术体制:v2.0[Z].北京:中国联通研究院,2019.

[8] ITU-T.Precision time protocol telecom profile for phase/time synchronization with full timing support from the network:G.8275.1[S].Geneva:ITU,2020.

[9] ZHANG J, LIU Y. Fiber Delay Compensation Techniques for IEEE 1588v2 in OTN[J].Journal of Optical Communications,2019,40(3):1121-120.

[10] 唐庆涛,袁野,应赟.1588v2技术在城域网中的应用与实现[J].邮电设计技术,2012(2):431-47.

1009-0940-2025（2）-10-13

5G音视频彩铃融合技术与研究

潘雅洁 中国电信股份有限公司江西分公司 江西省南昌市 330000
钟翠明 江西省邮电规划设计院有限公司 江西省南昌市 330008

摘 要：省内音频彩铃平台因多厂家分业务建设，存在设备老旧、能耗高、资源利用率低及维护成本高等问题，且现有5G视频彩铃平台难以满足业务发展需求。研究构建5G音视频彩铃融合平台，从音视频编码兼容、信令网关适配、业务网关统一、系统架构创新等方面入手，实现移动手机和固网用户的放音能力，支持被叫及主叫彩铃业务，推动彩铃业务可持续发展。

关键词：音频彩铃 视频彩铃 被叫彩铃 主叫彩铃 彩铃融合

0 引言

随着5G技术的快速发展，彩铃业务迎来了新的发展机遇。然而，省内现有的音频彩铃平台因多厂家分业务建设，存在诸多问题，如设备老旧、能耗高、资源利用率低及维护成本高等。同时，现有的5G视频彩铃平台也难以满足业务发展的需求。为了满足省内业务发展的需要，急需构建一个5G音视频彩铃融合平台。本文将从音视频编码兼容、信令网关适配、业务网关统一、系统架构创新等方面入手，实现音视频彩铃融合平台，推动彩铃业务的可持续发展。

1 音视频编码兼容

1.1 背景与重要性

音频彩铃和视频彩铃基于不同的技术架构，音频彩铃主要基于传统的语音网络和智能网络技术，而视频彩铃则依赖于4G/5G网络和IP多媒体子系统（IMS）技术。这种技术差异导致了两种不同的编码格式。为了实现音视频彩铃的融合，必须解决不同编码格式之间的兼容问题，确保用户在不同网络环境下都能获得高质量的彩铃体验。

1.2 高清音频编码

视频彩铃支持音视频彩铃、普通音频彩铃。普通音频彩铃的编码格式为G.711，而高清彩铃则采用AMR-WB编码格式，遵循3GPP TS 26.193规范标准。

1.3 视频编码

视频彩铃的编码格式统一采用.3gp格式的视频文件，物理分辨率最高可达720p高清标准。文件格式应支持3GP等VoLTE手机播放格式，视频播放长度应控制在48秒以内，并且视频的每个I帧前面都需要包含SPS和PPS。

1.4 高清音频、视频铃音资源

一个音频铃音ID或视频铃音ID的高清铃音音源包含高清铃音文件和普通铃音文件，用户在下载、赠送、设置等使用方式及计费方面无差异。彩铃平台会依据主叫彩铃、被叫彩铃等业务类型，同时结合主叫号码、呼叫时间、主叫终端能力以及彩铃用户的业务订购和设置等信息，来选择不同铃音及不同音质的铃音文件进行播放。

2 信令网关适配

信令网关分为信令模块、媒体模块。实现呼叫逻辑控制、彩铃播放、放音取键等功能。满足主叫、被叫业务的统一接入，根据《中国电信视频彩铃业务总体技术规范》《中国电信多媒体彩铃业务总体技术方案》，基于不同的业务逻辑进行信令处理及媒体播控等适配研究。

2.1 传统信令网关的问题与改进

传统彩铃平台的信令模块与媒体模块紧密耦合，这种设计虽然简化了系统架构，但在实际运行中容易出现

数据同步问题，影响系统的稳定性和可靠性。此外，系统的扩展性和灵活性也受到限制，难以快速适应业务需求的变化。因此，本文提出了信令与媒体分离的改进方案，通过模块化设计提高系统的可维护性和可扩展性。

2.2 呼叫接入与路由

支持主叫、被叫信令统一接入解析，可根据其信令流程处理非Precondition流程及Precondition流程中经过AS平台的资源预留问题。基于多元规则呼叫路由，通过“呼叫路由表+多元素组合+路由策略”的多元组合方式，解决主叫、被叫视频彩铃过程中核心网元接入兼容性问题，同时降低核心网侧设备IP或域名变更对彩铃平台呼叫处理的影响，且具备呼叫来源检测力度切换功能。

2.3 媒体播控

主叫、被叫彩铃业务相关的信令路由，对不同业务的信令采集，路由到媒体处理模块，由媒体进行放音播控，平台根据被叫用户的业务开通情况、主叫用户网络和终端的媒体能力对生成的话单进行分拣，定位用户话单归属业务及放音结果。媒体服务模块（RTPE）通过NFS方式挂载文件系统（FS）节点，考虑到IO读写的网络拥塞瓶颈，FS采用集群多节点方式汇聚式挂载每个媒体服务模块。

3 业务网关统一

3.1 设计思路与目标

为了实现音视频彩铃的融合，业务网关需要整合主叫视频彩铃、被叫视频彩铃和被叫音频彩铃等接口的业务，并与爱音乐业务受理平台进行数据同步。下面将从数据网关融合、铃音资源匹配和放音属性输出三个方面介绍业务网关统一的设计方案。

3.2 数据网关融合

本次平台融合改造包括数据网关及内部上报模块，实现按键、话单等数据的统一上报。在话单数据处理入库时，根据用户业务开通状态及协商结果标记，将话单分拣为主叫、被叫等不同类型的话单，并按不同类型的话单同步上报给业务受理平台。

3.3 铃音资源匹配

根据主叫用户发起地至被叫用户的呼叫，平台应根据主叫网络和终端的媒体能力匹配相适应的音视频彩铃，满足不同业务的缓存数据调度、格式化处理等需求。

主叫、被叫彩铃用户播放规则满足《中国电信视频

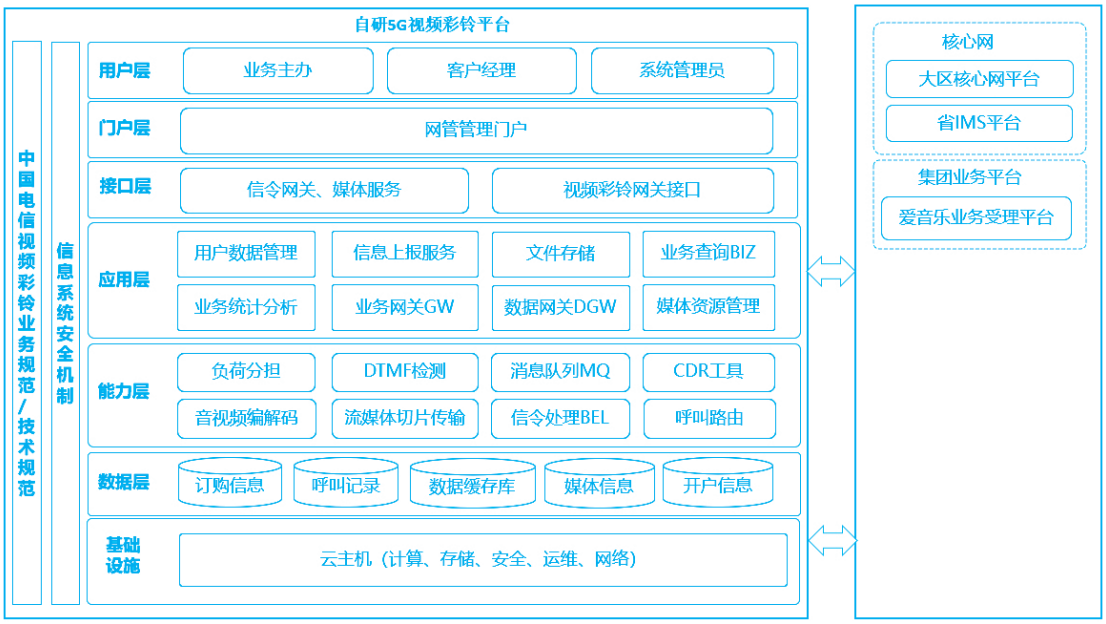

图1 视频彩铃融合前的系统架构图，实现基本的视频彩铃放音

彩铃业务总体技术规范（V2.0）》要求。

3.4 放音属性输出

业务逻辑进行放音时，根据被叫用户的业务开通情况、主叫用户网络和终端的媒体能力对最终放音结果进行协商，并标记放音结果来源属性，与用户业务开通状态一起透传。

4 系统架构创新

4.1 传统架构与创新架构对比

传统架构因采用紧耦合多层架构，各功能模块深度绑定，存在系统灵活性不足、扩展成本高等问题。以某省运营商为例，业务高峰期进行扩容时需整体替换硬件，成本激增200%。而创新架构通过两大突破实现显著提升：其一，采用模块化设计，让业务上线周期从4周缩短至2天；其二，实现信令与媒体的完全解耦，使处理时延降低20%。实践表明，新架构将系统峰值承载能力提升了2倍，同时运维成本降低20%，为5G时代彩铃业务的创新发展奠定了坚实基础。

（1）传统架构

传统架构定位于视频彩铃的内外对接，侧重与集团“爱音乐”平台的全流程贯通，从集团层入口实现视频资源接入，实现视频从订购、业务实现、计费的全流程闭环。如图1所示。

（2）创新架构

创新架构定位于视频和音频融合的一体化对接，在视频彩铃对接的基础上，侧重与省内OSS、计费等全流程贯通，集团与省层面均实现视频从订购、业务实现、计费的全流程闭环。如图2所示。

4.2 高速缓存机制

通过引入高速缓存机制，将关键业务数据存放于高速缓存中，业务查询不再依赖于关系型数据库的性能，从而显著提高业务查询效率。用户铃音订购、放音规则配置等数据是彩铃放音逻辑处理的关键业务数据，查询这些关键业务数据的效率是影响彩铃业务时延指标的主要因素之一。视频彩铃利用缓存数据库的高并发、低时延特点，将用户关键业务数据同步到缓存数据库中，通过缓存数据库即可查询关键业务数据，更好地支撑高并发、高时效要求的彩铃呼叫。

4.3 信令与媒体解耦

在语音系统中，信令网关控制器负责信令接续控制，媒体网关实现呼叫流程中语音的承载，通过信令与媒体的分离可降低业务耦合度，保障高并发情况下数据同步的安全性和时效性，提升系统可靠性。与传统话音增值平台信令处理和媒体服务分离模式不同，本平台针

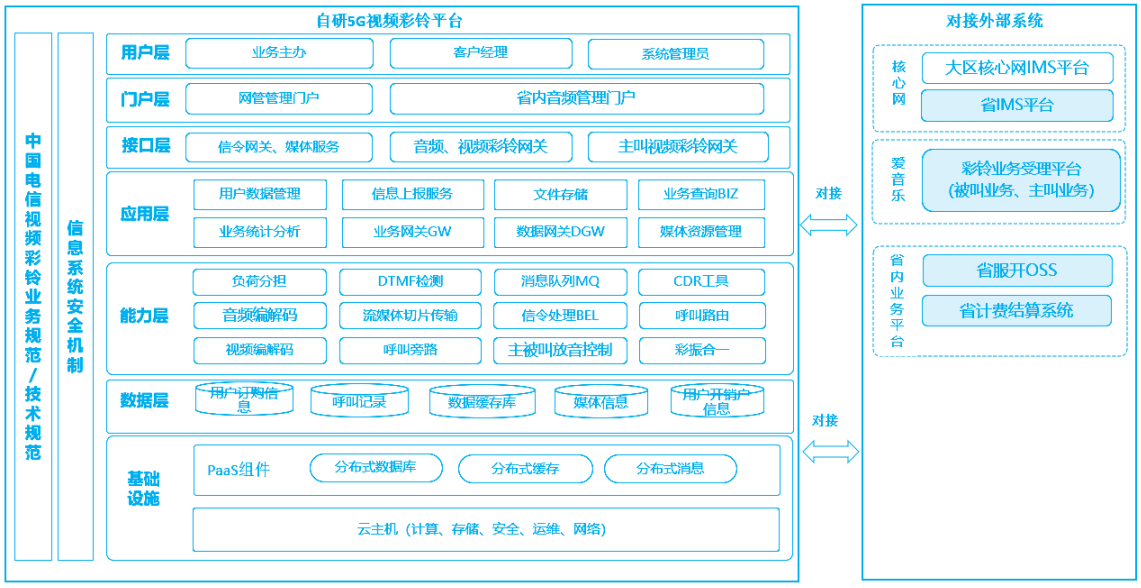

图2 视频彩铃融合后系统架构图，实现音频、视频融合放音

对早期彩铃业务侧重媒体信令协商的特点，将传统“信令和媒体分离”的信令处理细分为信令接入模块及信令逻辑模块：信令接入模块负责呼入核心网信令的基础处理与分发，信令逻辑模块专注于彩铃业务相关内容，使模块间分工更合理、耦合度更低。如图3所示。

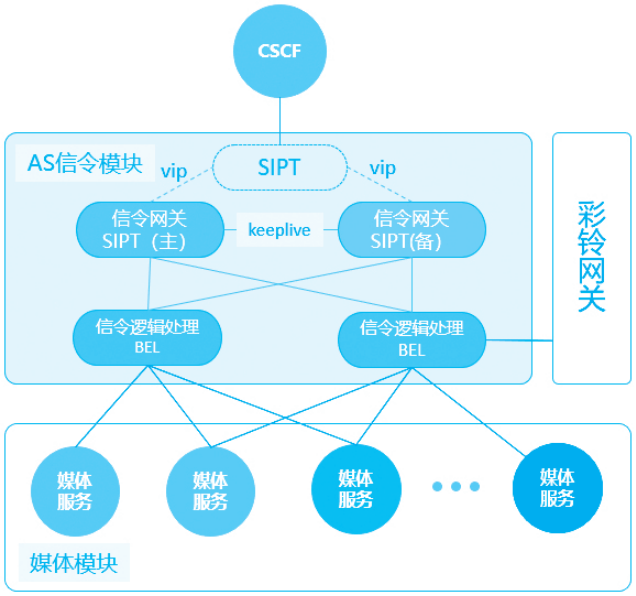

图3　信令与媒体服务通信交互

5　结束语

本文聚焦5G音视频彩铃融合技术的研究与应用，致力于打造一个功能强大且极具创新性的彩铃融合平台。通过深入的技术探索与实践，该平台成功实现了对音频彩铃和视频彩铃的支持，覆盖了移动手机和固话用户，极大地拓展了彩铃业务的用户群体和应用场景。在此基础上，平台不仅全面兼容并优化了现有的被叫彩铃业务，还为全省范围内主叫彩铃业务的创新推广提供了坚实的技术支撑和发展空间。未来，我们将进一步优化系统性能，探索更多的应用场景，推动彩铃业务的持续发展。

参考文献

[1] 中华人民共和国工业和信息化部.视频彩铃类业务互通技术要求:YD/T 4666—2024[S].北京:中国质检出版社,2024.

[2] 中华人民共和国工业和信息化部.移动智能终端支持视频彩铃的技术要求和测试方法:YD/T 4514—2023[S].北京:中国质检出版社,2023.

[3] 中华人民共和国工业和信息化部.基于统一IMS的业务测试方法多媒体彩铃业务:YD/T 2460—2013[S].北京:中国质检出版社,2013.

（上接第04页）

（1）区块链赋能的信任机制：利用区块链存证无人机飞行数据（如位置、时间戳），确保数据不可篡改。深圳市已试点基于FISCO BCOS联盟链的低空交通监管平台，实现飞行数据全链条追溯。

（2）多层级安全认证：建立“设备—网络—应用”三级认证体系，强制无人机接入前通过硬件指纹（如IMEI码）、数字证书（X.509）与行为特征（如飞行模式）联合验证。中国民航局CAAC认证要求无人机通信模块需符合《信息安全技术 蓝牙安全指南》（GB/T 38648-2020）安全标准。

4　结束语

通信技术在低空经济中的应用前景广阔，但也面临着频谱资源管理、成本控制和安全隐私等多重挑战。未来，通过技术创新、政策支持和商业模式优化，通信技术与低空经济的深度融合将为社会经济带来新的增长点，推动低空经济迈向更高的发展阶段。低空经济与通信技术的协同发展，不仅是技术进步的体现，更是社会经济高质量发展的重要引擎。

作为低空经济数字基础设施的主力军，中国联通通过技术创新与生态协同，在频谱效率、成本控制、安全防护等领域形成差异化优势。未来将持续深化5G-A、北斗、毫米波等技术融合，推动低空经济从“试点验证”迈向“规模商用”，助力构建“空中一张网、服务千行百业”的低空数字经济新生态。

1009-0940-2025（2）-14-17

IP城域网命令行操作安全管理的应用研究

张中宇 中国联合网络通信有限公司赣州市分公司 江西省赣州市 341000

摘 要：IP城域网作为网络强国建设的关键基础设施，其维护操作的安全性是保障网络稳定运行的关键因素。本研究的目的是深入分析现有网络设备管理操作的认证协议，提出一种基于HWTACACS协议的IP城域网命令行操作安全管理方案，并通过实际部署与测试验证了该方案的有效性和实用性。

关键词：IP城域网 命令行操作 安全 HWTACACS协议

0 引言

IP城域网是构建网络强国的关键部分，其稳定性和安全性对整个网络的稳定运行至关重要。随着网络技术的持续进步，IP城域网的规模和复杂性也在不断增加。尽管采用了IP城域网设备和板卡热备份、多方向物理路由等手段保障网络架构的安全，同时实施安全策略和部署安全防护设备防止IP城域网设备遭受攻击或非法入侵，但人为的错误和安全威胁依然是引发IP城域网故障和安全事件的主要原因。因此，对IP城域网命令行操作实施安全管理成为网络管理的一个重要方面。

近年来，出现了众多基于权限管理和认证授权的解决方案，例如远程认证拨号用户服务（Remote Au - thentication Dial In User Service，RADIUS）、终端访问控制器访问控制系统（Terminal Access Controller Access Control System，TACACS）和华为对TACACS进行的扩展（Huawei Terminal Access Controller Ac - cess Control System，HWTACACS）等。这些协议可以实施网络设备管理操作的集中认证和授权，大大提高了命令行操作的安全性和可控性。本研究将对这些技术进行详尽的对比分析，并提出一种基于HWTACACS协议的IP城域网命令行操作的安全管理方案，经过实际部署和测试，证明了该方案的有效性。

1 IP城域网命令行操作管理风险

1.1 人为操作问题风险

在IP城域网的常规维护过程中，维护人员通常利用命令行接口来配置和管理网络设备。Telnet命令行方式已成为城域网管理人员进行数据配置和维护排障的一项必不可少的重要手段，随之而来的Telnet账号管理则成为网管人员需要重点考虑的问题[1]。这为网络的稳定性和安全性提出了挑战。首先，在执行复杂配置过程中可能发生误操作，如配置错误的参数或执行不当的命令，这类误操作可能引发网络服务中断或性能降低。此外，由于缺乏有效的权限管理和审计机制，越权操作成为一个难以规避的问题，某些未获授权的人员可能会尝试对网络设备进行非法操作，有时甚至触发故障和安全事件。

1.2 人员定责和账号管理风险

当网络发生故障或安全事件时，快速定位问题源头及责任主体是实现应急响应与故障处置的关键。当前，缺乏完善的操作日志记录与审计机制，导致故障溯源和责任界定面临显著挑战。此外，受限于设备本地缓存空间，运行与操作日志易被覆盖，尤其在重大故障发生后，日志完整性缺失常成为阻碍故障原因分析及责任追溯的关键因素。

此外，当前网络设备访问控制普遍依赖用户名与密码作为单一认证手段，不同操作人员共用账号的现象较为常见。这种情况不仅增加了安全风险，还使得特定用户操作行为的追踪变得困难。同时，当维护人员岗位变动时，需专人负责设备账号的增删管理，该过程不仅工作量大，还易出现操作失误。

2 解决方案技术对比

2.1 RADIUS认证方案

RADIUS是一种广泛应用的认证、授权与计费协议。RADIUS服务器负责处理用户登录请求，执行用户认证，并根据预设策略授予用户权限。该协议的特点是支持多种认证方式，如密码、数字证书等，且能与多种后端数据库兼容。然而，RADIUS协议基于UDP，继承了UDP诸如只提供最优传输的特点，采用UDP协议进行通信则更加快捷方便，而且无连接的UDP协议会减轻RADIUS服务器的压力[2]，但缺乏服务器工作状态确认机制。RADIUS仅对客户端向服务器发送的access-request数据包中的密码字段进行加密，而用户名、授权服务、记账信息等其他数据包内容均以明文传输，存在被第三方截获的风险。此外，RADIUS主要聚焦于认证过程，无法精确控制维护人员对特定命令的使用权限。

2.2 TACACS认证方案

TACACS是一种认证、授权与计费协议，作为身份验证方案，可用于对尝试接入信息服务器、网络设备及远程接入服务器的用户进行验证[3]。该协议用于在安全服务器与网络设备之间实现访问控制通信。当远程用户试图通过网络访问资源时，必须先通过安全服务器的验证与授权，方可访问被授权的网络资源。与RADIUS不同，TACACS在认证、授权和计费三个阶段分别提供独立控制。其利用UDP协议进行数据传输，同时对通信内容进行加密，以保障传输安全。

2.3 HWTACACS认证方案

HWTACACS是由华为公司提出的，基于TACACS+的网络设备管理协议。TACACS+是在TACACS协议的基础上进行了功能增强的安全协议[4]，属于RFC 1492的标准规范，由思科公司提出。相比TACACS，TACACS+对整个认证会话进行加密，从而提供了更高的安全性。在设计时，考虑到了高度的灵活性和可扩展性，支持复杂的认证机制，实现了对用户权限的细粒度控制。该协议与RADIUS协议类似，采用客户端/服务器模式实现NAS与HWTACACS服务器之间的通信[5]。

相较于TACACS，HWTACACS与TACACS+的主要改进包括以下两点：

(1) 认证、授权和计费过程各自独立，且认证与授权能够在不同服务器上执行。由此，HWTACACS在服务器部署方面展现出更高的灵活性。

(2) 实现了基于用户级别，通过服务器对每一条命令行执行进行授权的机制，仅当授权得到批准，相关命令行才可被执行。因而，此机制大大简化了管理员对设备的管理工作。

TACACS采用UDP协议传输，而HWTACACS和TACACS+采用TCP协议传输，这是导致TACACS与后两者不兼容的主要原因之一。HWTACACS与TACACS+在认证流程和实现方法上一致，使得采用HWTACACS协议的设备能够支持与TACACS+服务器的对接。然而，HWTACACS和TACACS+在属性的字段定义及其解释方面有所不同，二者的属性可能存在不兼容情况。

以tunnel-id属性为例，HWTACACS和TACACS+均支持该属性，并将其定义为隧道建立时的本端用户名，这使得HWTACACS设备能够与TACACS+服务器实现对接。但对于uppeak属性，因HWTACACS支持而TACACS+不支持该字段定义，导致TACACS+设备无法解析该属性，进而造成属性信息对接失败。

3 部署实施过程

3.1 搭建HWTACACS服务器

为实现基于HWTACACS的命令行操作管理，需部署两台HWTACACS服务器形成主备架构，防止因单台服务器宕机导致业务中断。当终端用户登录设备时，交换机作为HWTACACS客户端，会将用户名和密码发送至HWTACACS服务器进行验证。验证通过并获得授权后，用户方可登录交换机执行操作，如图1所示[6]。

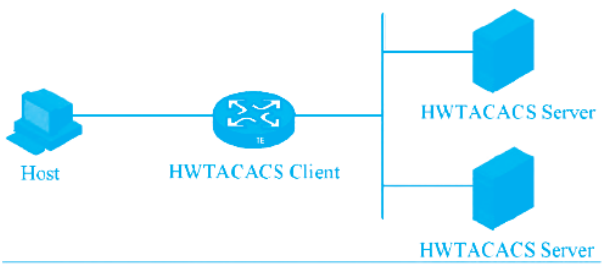

图1 HWTACACS应用组网

HWTACACS管理平台的搭建过程：

(1) 考虑到设备型号和数量，在HWTACACS服务器上进行NDG组配置，并设定设备端AAA报文的最大响应时间。同时，依据维护人员的各自职责，对HWTACACS服务器上的账号组权限级别进行配置，赋予需要读写权限的账号最高级别15，而仅需读取权限的账号则设定为级别1或2。

(2) 在部署具有主备功能的HWTACACS管理平台时，网络设备采用HWTACACS协议，优先向主HWTACACS服务器发送数据报文以进行认证。如果主服务器发生故障，网络设备会定期重发认证请求，并在连续三次重发未获得响应后自动切换到备用HWTACACS服务器，此时由备用服务器接管账号认证管理。

(3) 在HWTACACS管理界面中，将账号密码的有效期设置为90天，以符合运维规程的要求。为便于账号密码的修改，我们安装了Apache WWW服务器及UCP插件。安装Apache WWW服务器时，须设置两个目录的权限以适应UCP的需求：C：/Inetpub/wwwroot/secure设为只读权限；C：/Inetpub/wwwroot/securecgi-bin设为读写和执行权限。UCP为HWTACACS服务器的组件之一。安装Apache WWW服务器并配置UCP后，网络维护人员得以通过UCP页面直接更新账号数据库密码，免除了逐一登录设备修改密码的需求。

3.2 设置角色的授权命令集

在HWTACACS服务器上，管理员借助正则表达式定义各角色的授权命令集。正则表达式是一种强大的文本处理工具，它可以用来描述一系列符合某个句法规则的字符串。其优势在于能够灵活控制用户可执行命令的范围，并便于根据需求进行调整。例如，监控或现场设备维护人员可能仅被授权执行查看设备状态的命令，而专业主管则可能被授权执行更多涉及配置变更的命令。精确命令授权有助于防止误操作和越权操作，从而提升网络操作的安全性，如图2所示。

3.3 城域网设备配置HWTACACS协议及参数

HWTACACS服务器搭建完成后，需进一步对IP城域网中的网络设备进行HWTACACS协议及其相关参数配置，涉及设定HWTACACS服务器的IP地址、端口号

图2 精确命令授权

和密钥等关键信息，并制定设备与服务器间的通信策略。一旦配置正确，网络设备便会在接收到用户登录请求时将该请求上报至HWTACACS服务器处理，并依据服务器返回的认证与授权结果决定是否授予用户登录及执行命令的权限。

在IP城域网中有着多种设备型号，虽然各设备的配置命令不一样，但其功能和实现方式是一致的。以华为S6506R设备配置为例：

(1) 配置Telnet认证

[Quidway S6506R] user-interface vty 0 4

[Quidway S6506R-ui-vty0-4] authentication-mode scheme

Notice：Telnet or SSH user must be added , otherwise operator can't login!

如果要对Telnet后执行的命令行进行授权，则要进行如下配置：

[Quidway S6506R-ui-vty0-4] authentication-mode scheme command-authorization

(2) 配置Domain

[Quidway S6506R] domain hwtacacs

(3) 配置HWTACACS 3A服务器IP地址

[Quidway S6506R] hwtacacs scheme tacacs

[Quidway S6506R-hwtacacs-tacacs] primary authentication 134.247.*.1

[Quidway S6506R-hwtacacs-tacacs] primary

```
<Quidway S6506R>dis vlan
 Now, the following VLAN exist(s):
  1(default), 2, 6, 33, 44, 401, 1000-1999, 3000-3003, 4000
 ---  1011 VLAN(s) found  ---
<Quidway S6506R>dis arp
 This command can't be executed because of no such privilege!
<Quidway S6506R>
```

图3　效果验证

authorization 134.247.*.1

[Quidway S6506R-hwtacacs-tacacs] primary accounting 134.247.*.1

(4) 配置3A加密Key

[Quidway S6506R-hwtacacs-tacacs] key authentication G*****2

[Quidway S6506R-hwtacacs-tacacs] key authorization G*****2

[Quidway S6506R-hwtacacs-tacacs] key accounting G*****2

[Quidway S6506R-hwtacacs-tacacs] user-name-format without-domain

(5) 配置Domain和HWTACACS的关联

[Quidway S6506R] domain hwtacacs

[Quidway S6506R-isp-hwtacacs] scheme hwtacacs-scheme tacacs

(6) 添加一个本地用户，以防HWTACACS服务器掉线

4　效果验证

部署完成后，对基于HWTACACS协议的命令行操作安全管理方案进行了效果验证。验证内容主要包括认证功能、授权功能及审计功能的测试。通过模拟不同角色用户对网络设备的登录和命令执行场景，HWTACACS服务器可正确执行用户认证和命令授权操作。同时，设备记录的操作日志完整无误，满足审计功能要求。验证结果表明，该方案能够满足IP城域网命令行操作管理的安全需求，并在实际运行中展现出预期效果，如图3所示。

5　结束语

研究分析表明，随着网络技术的发展，安全挑战日益增加，尤其是IP城域网的安全管理。传统的命令行操作方式已无法满足现代网络管理的安全需求，而实施基于HWTACACS的命令行操作安全管理方案，能够显著增强IP城域网的操作安全性和系统稳定性。实际部署与测试结果证实了该方案的有效性和实用性。

随着网络规模的扩大和安全威胁的复杂性增加，IP城域网命令行操作的安全管理优化与完善需持续推进。结合人工智能技术，有望实现智能化的异常行为检测与预防；探索应用区块链技术，可确保操作日志的不可篡改性，进而提升审计功能的可靠性。总体而言，IP城域网命令行操作的安全管理是一项长期且复杂的任务，需要业界持续合作与不懈探索。

参考文献

[1] 张龙江,王元杰,李爱民.基于ACS的账号集中认证系统部署探析[J].信息技术与信息化,2013(3):103-106.

[2] 朱玲.浅谈Radius服务器的功能原理及交互过程[J].科技创新与应用,2015(27):84.

[3] 张树帆.基于命令行授权的IP城域网安全维护探析[J].中国新通信,2016,18(20):59.

[4] 侯伟.IDC设备分权分域认证管理的实现方法[J].信息与电脑(理论版),2020,32(11):164-166.

[5] 郑庆达.TACACS+技术应用[J].科技传播,2013,5(17):229-230.

[6] 范新龙,张华,王超,等.HWTACACS接入技术应用研究[J].现代电子技术,2010,33(9):95-97.

1009-0940-2025（2）-18-21

基于5G的配电自动化通信网络改造方案研究

杨 柳 江西省邮电规划设计院有限公司 江西省南昌市 330008

摘 要：本文聚焦5G通信技术在配电自动化领域的适配性研究，通过对配电网现有主流通信技术的对比分析，深入阐释5G通信技术应用于配电自动化系统的独特优势与适用价值。针对老旧开闭所的运行特性和实际改造需求，设计了一套基于5G通信技术的配电自动化通信网络改造方案。该方案具备显著技术优势：改造期间可保障配电网持续供电，实现保护功能同步升级；依托成熟技术体系，具备良好的推广应用价值；同时有效降低改造难度与成本投入，为老旧配电设施的智能化改造提供了高效、可靠且安全的实施路径。

关键词：5G通信技术 配电自动化 无线通信 改造方案

0 引言

作为电力系统终端部分的配电网，直接关系到用户的用电体验。实现配电自动化是提升其供电可靠性与推进智能化运营管理的关键环节。在推进老旧开闭所和配电房的配电自动化改造时，会遇到诸多挑战，包括通信方式的确定以及全所断电等问题。传统配电网通信技术主要包含无线通信与有线通信，然而在老旧设备更新改造、施工建设以及运维管理等环节依然存在诸多瓶颈。针对此类问题，本文提出基于5G通信技术的配电自动化通信网络改造方案。5G具备大容量、高可靠、低延迟、多接入、高速率、低能耗等特性，配合网络切片技术，可有效满足配电自动化系统对传输数据的迫切需求。

1 5G通信技术在配电网中的适用性

随着信息化技术的持续进步，配电自动化系统对于通信技术的要求也在不断提高。这不仅涉及支撑电网保护装置的敏捷且精准的响应能力，还关系到能否实现对海量运行数据的高效收集与实时监测。在面对数据传输需求的迅猛增长以及配电网架构日益复杂化的趋势时，传统通信手段的技术局限性逐渐凸显。而5G通信技术，凭借其突出的技术特性，为解决这些行业挑战提供了创新性的解决方案。

1.1 配电网主流通信技术

配电网作为电力系统连接终端用户的最后环节，其供电质量直接关系到用户用电体验，因此推进配电自动化转型已成为行业发展的紧迫任务。配电自动化系统通过与开闭所各单元进行数据交互，实现“遥测、遥信、遥控、遥调”的四遥监控功能，这要求通信网络必须具备高安全性、高稳定性和高可靠性。当前，配电网通信主要采用有线传输与无线传输两种技术路径[1]。

（1）有线通信

我国配电网通信系统以光缆、电缆等有线通信为主。电缆通信稳定抗干扰，但随着配电网发展，存在布设成本高、布线杂乱、维护困难的问题。光纤通信在新建项目中因传输快、组网灵活被广泛应用，然而在存量改造时，因施工需断电，与配电网高可靠运行要求相悖，成为传统有线通信技术发展瓶颈。

（2）无线通信

在配电网领域，无线通信凭借免布线的天然优势，可助力配电自动化设备以低成本方式组成网络。现有电力无线技术有专网和物联网之分：230MHz专网，覆盖广、带宽小，适用于小数据业务；1800MHz专网，带宽大、覆盖弱、成本高，适配核心业务；物联网依托3G/

4G公网实现通信，覆盖范围广泛但安全性较低，仅适用于智能电表等非核心业务场景[2]。然而，有线通信在偏远地区部署成本高昂，而现有无线技术受限于频段特性或存在安全风险，均无法同时满足配电自动化对于高速、宽带、安全通信的需求。

1.2 5G通信技术适配配电自动化的关键技术和问题

作为新一代无线通信技术的标杆，5G凭借其革新性技术架构，为配电自动化通信网络提供了兼具高性能与高可靠性的解决方案。其技术优势与适配性主要体现在以下六个方面[3]。

◎ 超大带宽特性：毫米波频段与频谱聚合技术提供100MHz级传输带宽，数据吞吐能力较传统技术提升10-100倍，满足实时监控和控制指令的高速传输需求。

◎ 高可靠通信保障：通过空口冗余传输和网络切片隔离，通信可靠性达99.999%以上，降低通信中断风险，保障电力系统稳定运行。

◎ 毫秒级低时延：端到端时延控制在10ms以内（工业级场景1ms），满足配电网实时保护控制的快速响应要求，提升故障处理效率。

◎ 大规模连接能力：基于NB-IoT/eMTC技术，单基站支持百万级设备接入，实现配电网设备的泛在感知与集中管理。

◎ 超高速传输性能：理论峰值速率超10Gbit/s，实现大文件秒级传输，突破数据实时性瓶颈。

◎ 低功耗运行优势：通过休眠模式优化等技术，5G终端待机功耗降至mW级，延长设备续航，降低运维成本。

5G网络切片技术将物理架构转为多个虚拟网络，可定制参数以保障业务独立运行、避免干扰，并通过逻辑隔离提升数据传输安全性。在电力通信系统中，它构建电力业务专属虚拟通道，规避公网安全风险，为配电自动化关键数据提供端到端加密防护。其在配电自动化领域的应用主要体现在以下方面[4]：

（1）配电设施集中监控类非实时业务。在配电房与开闭所构建5G专网后，运维人员能够远程集中监测并实时操控辅助控制系统、视频监控系统以及巡检机器人等设备。该场景同时支持移动作业终端与AR巡检设备的接入应用，通过5G网络实时回传现场采集的设备状态数据、巡检影像及远程协作画面。鉴于视频流与AR数据的传输需求，此类业务对网络带宽有较高要求（通常需100Mbit/s级接入能力），但对时延敏感度相对较低。

（2）测控装置与继电保护实时业务。当配电网线路中的环网柜、柱上开关、隔离开关等设备运用5G网络通信时，能够达成线路保护及测控功能的高速数据交换，时延仅为毫秒级，这有力支持了快速故障切除以及实时遥控操作的高效开展。目前，通用变电站事件（GOOSE）、采样值（SV）以及RS-485报文的单帧数据量一般在十几到数百字节的范围内。当保护装置启动时，需要在极短的时间内完成高频数据的传输（经典场景为每秒900帧，单帧180字节）。依据技术标准《光纤通道传输保护信息通用技术条件》（DL/T 364—2019），此类业务的带宽需求可按以下方法计算[5]：

$$B = \frac{L}{\Delta T} N \times 8 \times 900 = \frac{180}{1} \times 2 \times 8 \times 900 = 2.59\text{Mbit/s}$$

式中：B为带宽；ΔT为采样时间间隔；N为终端个数；L为报文字节数。

依据带宽模型计算，配电网保护装置的纵联通信至少需要2.59Mbit/s的带宽，同时单向传输时延应不超过14ms。在这样的实时业务场景下，5G网络切片技术可将物理网络设施分割为多个独立的虚拟网络，为各类业务提供专属的通信信道。各独立虚拟网络能依据业务的特性，例如带宽需求、时延要求、可靠性标准等，进行灵活的定制化配置，确保继电保护控制类高实时性业务与设备状态监测类非实时业务的隔离运行，在避免相互干扰的同时，实现对各类场景差异化需求的精准适配。

综上所述，5G通信技术在配电自动化的通信应用中具有显著优势和高度的契合度。通过5G通信技术，能够助力配电网实现更高效、更快速、更可靠且更安全的电力提供服务。

2 基于5G技术的配电自动化通信改造方案

针对老旧开闭所的实际工况与场景特性，设计一套基于5G通信技术的配电自动化通信网络改造方案。该

方案通过技术可行性、施工便捷性、成本经济性及推广适配性的有机结合，有效破解传统改造中面临的停电影响、施工复杂等难题，为存量配电设施的数字化升级提供了可复制的实施范式。

2.1 老旧开闭所保护改造

当前老旧开闭所保护装置改造工程中，通常选用兼具简易性、成熟度与可靠性的新型保护设备。此类装置集成开关状态采集、远程控制、电参量测量及RS-485总线通信等核心功能，为配电自动化系统提供基础数据交互能力。

采用RS-485总线协议的保护装置能够与主站和周边设备进行高效的数据交换。引入开关量输入信号后，主站系统通过无线数据传输单元实现实时监测。这种分布式数据传递模式优化了设备响应速度和信息流通效率，为老旧设施的智能化升级改造提供灵活高效路径。

2.2 开闭所内部通信改造

改造方案采用双CPE设备配置模式：实时业务专用CPE应用于保护测控装置等高敏感设备场景，依托定制化网络切片技术实现低时延与高安全保障，确保控制指令的实时响应和设备状态的精准监控；非实时业务专用CPE则针对带宽敏感型业务设计，支持高速数据传输与高清视频回传功能。两类CPE的差异化部署架构通过图1所示的网络拓扑示意图清晰呈现，该方案有效实现业务隔离与资源优化配置，既规避传统有线改造的停电风险，又通过技术分层满足多元通信需求。

2.3 开闭所外部通信改造

针对开闭所内设备的多元通信需求，外部改造方案采用差异化技术配置策略：

（1）实时业务通信架构优化

保护测控装置与对侧保护设备、主站的连接，经实时业务5G CPE组网实现。其中，保护装置间通信以直连模式，跳过交换机等中间节点，从物理层架构上保障继电保护信号的高可靠性传输。与主站通信则通过本所CPE与主站通信集中单元直接交互。针对继电保护等业务对时延敏感的特性，实时通信场景采用超可靠、低时延通信（URLLC）技术，配置独立网络切片资源。该方案在满足DL/T 364—2019标准对保护通信带宽要求的基础上，通过切片隔离机制实现14ms级单向时延控制，确保保护指令的快速响应与数据传输的端到端安全。

（2）非实时业务通信架构设计

视频监控、电能表数据采集等业务因涉及高清影像流和批量数据传输，对网络带宽有更高需求但时延容忍度较高，故采用增强移动宽带（eMBB）技术方案。该类业务通过独立部署的非实时业务5G CPE接入网络，匹配大带宽切片资源，可实现100Mbit/s级数据吞吐量，满足海量监测数据并发上传与高清视频流实时回传需求。两类业务的网络划分如图2所示，通过URLLC与eMBB技术的场景化适配，形成业务隔离的高效通信体系。

（3）安全隔离与加密设计

为防范跨业务网络的信息交互风险，方案在实时与非实时业务的切片网络边界引入纵向加密技术。通过部署专用安全网关，实施双向身份认证、数据链路层加密及访问控制策略，构建物理隔离的安全屏障。该机制有

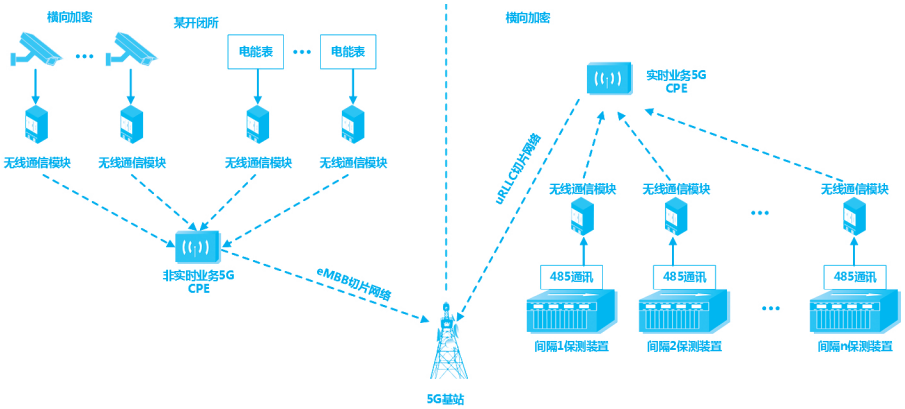

图1 开闭所内部通信改造方案示意图

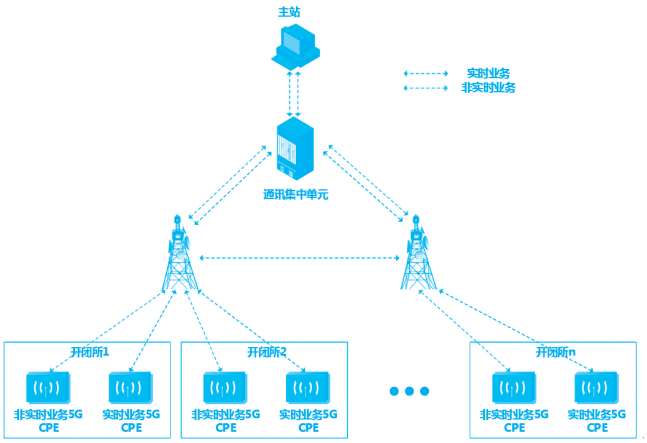

图2　开闭所外通信改造方案示意图

效保障继电保护控制数据的机密性与视频监测数据的完整性，避免不同业务网络间的信号干扰与数据泄露，为配电自动化系统构建多层次的安全通信架构。

3　方案优点分析

3.1　改造过程不停电

改造方案实现全流程不停电，施工时无须停电，避免影响用户供电，提升可靠性。分布式DTU联调采用模拟断路器验证，通过控制通信模块独立电源，单开关测试时仅激活对应模块，形成物理隔离，确保联调安全且不影响其他设备。

3.2　改造难度和成本低

改造方案针对老旧开闭所光缆敷设难题，提出免重新布线方案，只需安装调试无线通信模块即可完成改造。成本主要集中于模块加装，相比传统光纤改造，施工难度更低、成本显著下降。同时，方案支持保护装置升级与模块安装并行推进，可同步实现设备更新与配电自动化改造，有效缩短工期、节约资源，大幅提升老旧开闭所改造效率。

3.3　技术成熟、可实施性强

改造方案采用的无线通信及5G通信技术均为行业成熟技术。其中，无线通信技术在电力系统中已通过广泛验证，所选用的5G通信模块为市场主流成熟型号，其技术稳定性与产品可靠性经多场景应用考验。这既提升了方案的工程实施可行性，也为后续大规模推广夯实了技术与产业基础。

4　结束语

本文提出的5G配电自动化通信网络改造方案，有效解决了传统配电改造中施工难度大、成本高和供电稳定性不足等棘手问题，为老旧开闭所的数字化升级开辟了高效途径。未来，随着5G通信技术的持续升级，其在配电网中的应用范围将不断扩大。同时，5G与人工智能、物联网、大数据等新兴技术的深度结合，将有力推动配电自动化系统向更高层次的信息化、智能化、数字化方向发展，促进电力系统运行管理的全方位智能化升级与效率提升。

参考文献

[1] 梁芝贤,王剑,谷明英.智能配用电网通信技术应用研究[J].电力系统通信,2012(3):10-11.

[2] 国海,陈松,权悦.配电网自动化通信方案的对比及应用设计[J].电子技术,2008(9):25-27.

[3] 姚俊.智能配电网通信组网技术研究及应用[J].信息化建设,2016(6):112.

[4] 冯利伟,马永红,王一蓉.EPON在配网自动化系统中的应用[J].电力系统通信,2010(4):77-78.

[5] 唐超洋,王清海.智能配电网中无线通信技术的应用研究[J].机电信息,2020(30):33-34.

1009-0940-2025（2）-22-26

基于LoRa+数字孪生的大坝安全监测系统在水利中的应用

钟志坚 中铁水利信息科技有限公司 江西省南昌市 330209

摘 要：大坝安全监测是水利工程管理的核心环节，传统方法在实时性、数据覆盖范围和智能化分析方面存在显著不足。本文提出了一种融合远距离无线电（Long Range Radio，LoRa）技术与数字孪生技术的大坝安全监测系统，通过LoRa实现低功耗、广域覆盖的数据传输，结合数字孪生技术构建高精度动态模型，实现对大坝结构的全生命周期监测与预测。该系统在多个水利工程中部署应用，验证了其在提升监测效率、降低运维成本及增强预警能力方面的有效性。研究成果为智慧水利建设提供了创新性解决方案。

关键词：LoRa技术 数字孪生 大坝安全监测 物联网 实时预警 智慧水利

0 引言

大坝作为水利工程的核心设施，其结构安全直接关系到防洪、发电、灌溉等功能的实现。传统监测手段依赖有线传感器和人工巡检，存在布线复杂、响应滞后、数据孤立等缺陷。近年来，物联网（IoT）和数字孪生技术的快速发展为水利工程智能化监测提供了新思路。

◎ LoRa技术：支持远距离（3~15km）、低功耗的无线通信，适用于大坝复杂地形环境。

◎ 数字孪生：通过虚拟模型实时映射物理大坝状态，结合历史数据与机器学习实现故障预测。二者的结合可构建覆盖广、实时性强、分析智能化的新型监测体系，显著提升大坝安全管理水平。

1 总体设计

1.1 系统架构设计

按照数字孪生技术建设要求和水利现代化发展需求，设计基于LoRa+数字孪生的大坝安全监测系统总体架构，其总体架构分为感知层、传输层、平台层、应用层、网络安全体系和运维保障体系，详细系统架构如图1所示。

◎ 感知层：主要是采集工程运行过程中的各类数据信息，包括渗压、渗流、变形、视频、水位、雨量、温度、流量等信息。

◎ 传输层：将感知层采集的数据信息，通过LoRa、4G/5G或光纤等网络设施上传至云平台。

◎ 平台层：平台层是基于LoRa+数字孪生的大坝安全监测系统的“中枢”，是大坝安全监测数据处理及业务应用的系统基础，建设内容包括数据底座平台和应用支撑平台，可实现对感知层监测的数据清洗、存储、分析、计算后构建数字孪生模型。

◎ 应用层：将监测的数据融合水库的基础信息构建出可视化界面展示给管理人员，同时对监测数据做出预警预报，并向管理人员提供决策支持。

1.2 硬件设计

硬件系统主要由LoRa传感器节点与LoRa网关构成，整体硬件架构拓扑如图2所示。

LoRa传感器节点负责对LoRa网关的询问做出响应，负责对连接的传感器进行数据采集，并将采集的数据上报至LoRa网关。

LoRa网关负责定时询问LoRa传感器节点和接收LoRa传感器节点上报的数据信息然后再将LoRa传感器节点上报的数据信息进行处理转换后上报给云服务器，同时对云服务器的下发信息做出响应。

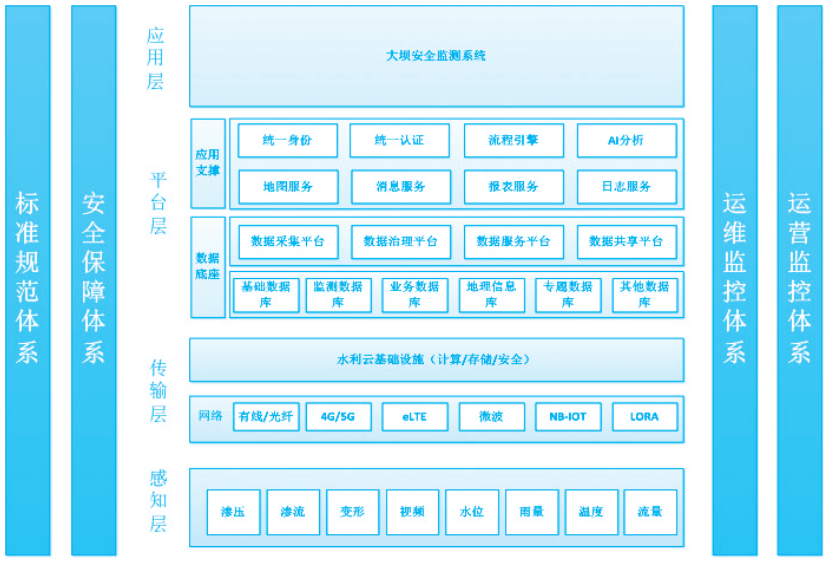

图1　系统架构

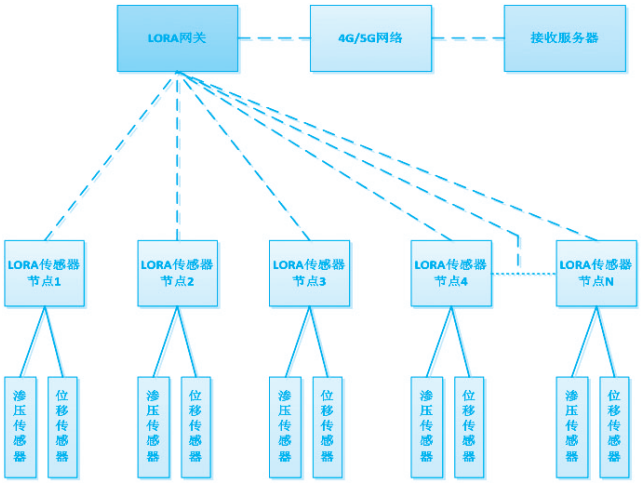

图2　硬件架构拓扑

传感器节点：采用低功耗MCU（STM32F103VCT6）设计，集成加速度计、渗压计、水位计、雨量计、GNSS等传感器；通信模块选用Semtech SX1268芯片，工作频段410.125MHz~493.125MHz，发射功率30dBm，传输距离可达10km，支持空中唤醒功能。

网关：支持多信道数据接收，配备冗余电源和防雷设计，适应野外环境。

1.3　软件设计

1.3.1　数字孪生模型构建

基于BIM（建筑信息模型）与GIS数据，使用Unity3D实现三维可视化，并集成ANSYS进行力学仿真，并将仿真结果实时反映在模型上，整个数字孪生模型架构如图3所示。

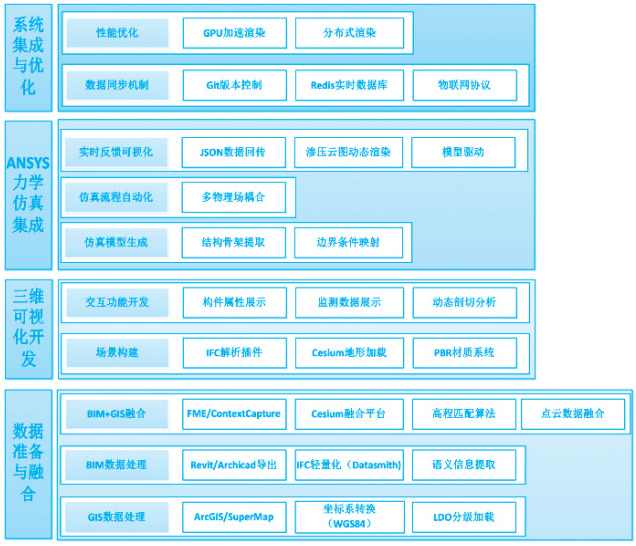

图3　数字孪生模型架构

（1）数据准备与融合：首先进行BIM数据处理：通过BIM软件生成水库大坝的建筑模型，导出IFC（Industry Foundation Classes）格式，包含几何、材料、构件属性等信息；使用FBX Exporter（Unity）优化模型面数和材质，避免引擎渲染压力；解析BIM中的元数据

（构件ID、功能分类），为后续仿真和交互提供逻辑关联。其次是GIS数据处理：通过ArcGIS、SuperMap等软件获取水库大坝的地形地貌数据，格式包括Shape-file、GeoTIFF、点云等；然后将BIM的局部坐标系转换至GIS的全局坐标系；LOD（多细节层次）处理，根据可视化范围动态加载GIS数据，水库大坝周边切换为高精度点云。最后进行BIM+GIS融合：使用FME、Bentley ContextCapture或Cesium平台实现数据融合；将BIM建筑模型精准嵌入GIS地形场景，确保水库大坝基底与地形曲面精准贴合。

（2）三维可视化开发：首先进行场景构建：BIM模型通过IFC解析插件导入引擎；GIS地形通过Cesium for Unreal/Unity插件动态加载全球或局部地图；基于物理的渲染（PBR）材质赋予水库大坝的真实质感；动态全局光照（如Unreal的Lumen）模拟自然光照变化。其次是交互功能开发：点击模型获取BIM属性（包括现场的监测设施位置，监测数据和上报日期等信息）；动态切割模型查看内部结构。

（3）ANSYS力学仿真集成：从BIM中提取结构骨架导入ANSYS Mechanical中，转换为有限元网格；基于GIS环境数据（温度、湿度、气压等数据）定义仿真约束；编写参数化仿真脚本；耦合ANSYS Fluent（流体）与Mechanical（结构）进行风振分析；将仿真结果（位移数据）导出为JSON格式，通过WebSocket传输至可视化引擎；在Unity中解析数据并驱动模型形变、颜色映射。

（4）系统集成与优化：使用Git管理BIM/GIS数据更新，确保多团队协作一致性；部署Redis处理传感器实时数据流；利用Unity的Burst Compiler提升粒子系统物理计算效率；采用Unity Render Streaming实现云端渲染，支持低端设备访问复杂三维场景。

1.3.2 数据分析算法

采用LSTM（长短期记忆网络）预测结构形变趋势，结合阈值法触发初步预警，并利用模糊逻辑对复杂场景进行多级风险评估，最终生成动态预警信号，整个数据分析算法流程如图4所示。

图4 数据分析算法流程

（1）传感器数据：通过前端的LoRa设备获取的结构形变时序数据（渗压、渗流、位移、倾斜角、应变等）；现场环境的温度、湿度、风荷载等外部因素数据。

（2）数据预处理：采用滑动平均滤波消除高频随机噪声（如电磁干扰），结合小波变换分离信号特征频段以应对非平稳噪声；针对数据缺失问题，基于传感器时空关联性进行插值补全，并引入生成对抗网络（GAN）合成符合物理规律的虚拟数据；最后通过Z-score标准化统一多源数据量纲（将位移单位mm转换为标准差归一化值），同时实现毫秒级精度的时间戳同步，确保多传感器数据流在统一时间轴上精准对齐，为后续分析提供高质量输入。

（3）LSTM预测模型：LSTM预测模型采用时序驱动架构，输入层以时间窗口切片（历史24小时内的所有监测数据）构建时序特征向量，隐藏层通过双向LSTM捕获前后向长程依赖关系，并嵌入注意力机制动态聚焦关键事件节点（降雨量增大时候的渗压值），输出层不仅生成未来6小时渗压量预测值，还通过蒙特卡洛Drop-out技术输出置信区间实现不确定性量化。模型训练采用Huber Loss平衡预测精度与异常值鲁棒性，结合时空交叉验证策略（按空间分区划分训练/验证集）防止过拟合，确保在复杂环境下的泛化能力。

（4）形变预测值：基于LSTM深度学习模型输出的核心预警指标，通过输入层（历史24小时内的所有监测数据）经双向LSTM与注意力机制提取时空特征后，生成未来6小时的渗压量预测，并利用蒙特卡洛Dropout技术量化预测不确定性，输出置信区间（85%置信度下

位移范围）。该预测值不仅反映结构形变趋势，还通过误差边界评估可靠性，为后续阈值判断与模糊逻辑推理提供兼具数值精度与可信度的关键输入，直接驱动多级预警决策。

（5）阈值判断：动态阈值设定采用静动结合策略，静态部分依据设计规范设定安全阈值（大坝位移限值10mm）和历史最大值60%的警戒缓冲阈值，动态部分通过滑动窗口统计（近期数据均值 ± 3σ）实现自适应调整，并耦合ANSYS物理仿真得到的应力—位移关系对阈值进行修正，从而形成融合设计规范、历史数据与物理仿真的多维度预警基准。

（6）模糊逻辑推理：模糊逻辑推理模块通过三角形/高斯隶属度函数将输入变量（形变量｛“微小/中等/严重”｝、变化速率｛“平缓/加速/骤变”｝）模糊化，并基于专家规则库（如“形变量中等且加速→橙色预警，形变量严重或水位超限→红色预警”）实现多级预警决策。

（7）多级预警输出：根据形变预测值与动态阈值判断结果，系统通过模糊逻辑推理生成分级警报，具体分为绿、蓝、黄、橙、红五级：绿色表示安全状态（渗压值低于安全阈值的10%，不触发预警）；蓝色预警触发于渗压值超过安全阈值的10%但低于20%，此时系统仅记录日志；黄色预警触发于渗压值超过安全阈值的20%但低于40%，系统将启动高频监测模式；橙色预警触发于渗压值超过安全阈值的40%但低于60%，需人工介入核查；红色预警触发于渗压值超过安全阈值的60%，系统将立即触发应急响应与设备联动。所有预警结果均同步联动三维BIM模型，实时标红预警区域并进行可视化展示。

2 关键技术实现

2.1 LoRa网络优化

数据校验机制：LoRa传感器节点与LoRa网关通信时，采用设备地址校验与数据CRC校验双重机制，通过设备地址唯一性验证避免同频设备数据串扰，结合CRC校验算法对传输数据进行完整性校验，有效提升通信链路的稳定性与抗干扰能力。

动态唤醒机制：LoRa传感器节点的MCU与通信模块均配置为外部唤醒模式，使节点待机功耗控制在1mA（12V）以内。当到达采集时间时，LoRa网关通过下发唤醒指令激活传感器节点，触发数据采集与上报流程，确保LoRa传感器节点在低功耗模式下依旧可以正常工作。

2.2 数字孪生模型驱动

实时数据映射：传感器数据通过网络协议同步至孪生模型，最快更新频率可达1秒钟/次。

多物理场耦合分析：结合渗流场—应力场耦合模型，评估大坝长期稳定性。

2.3 安全预警策略

大坝安全监测系统构筑了四级预警机制：

◎ 正常状态（绿色）：数据值未超出安全阈值的10%，系统正常展示。

◎ 一级预警（蓝色）：数据值超出安全阈值10%但未达20%，触发初步预警。

◎ 二级预警（黄色）：数据值超出安全阈值20%但未达40%，启动强化监测。

◎ 三级预警（橙色）：数据值超出安全阈值40%但未达60%，需人工介入核查。

◎ 四级预警（红色）：数据值超出安全阈值60%，触发最高级别应急响应。

3 应用案例与效果分析

3.1 案例背景

某水库土石坝坝高85米，坝长320米，通过部署20个LoRa节点与1套LoRa网关，实现对坝体、坝基区域的监测覆盖。监测内容包括渗流、渗压、位移、水位、雨量、风速、风向及气压等多维度数据。

3.2 实施效果

本文以案例水库为研究背景，对传统人工测量方式、有线监测系统及LoRa无线系统进行实施效果比对，具体如表1所示。

表1 三种系统的实施效果对比

评估维度	传统人工测量	有线监测系统	LoRa无线系统
管理与施工成本	高	中	低
管理人员技术要求	高	低	低

评估维度	传统人工测量	有线监测系统	LoRa无线系统
信号采集线路干扰	低	高	低
采集上报效率	低	高	高
运维难度	低	中	低
设施安装损伤程度	低	高	低
环境适应性	中	低	高
极端天气应对能力	中	高	中

综合对比分析表明，在常规平整的水库大坝上使用LoRa系统作为大坝安全监测实施方案有显著优势：管理与施工成本低、对管理人员技术要求低、信号采集线路干扰少、数据采集上报效率高、运维难度小，且设施安装对坝体的损伤程度低。

预警实例：2023年汛期，案例水库因持续强降雨出现渗流渗压异常征兆，本监测系统借助时序预测模型提前48小时预警坝体局部渗流渗压监测数据异常。经现场技术人员排查核实，结合专家安全处置，成功避免安全事故发生，如图5所示。

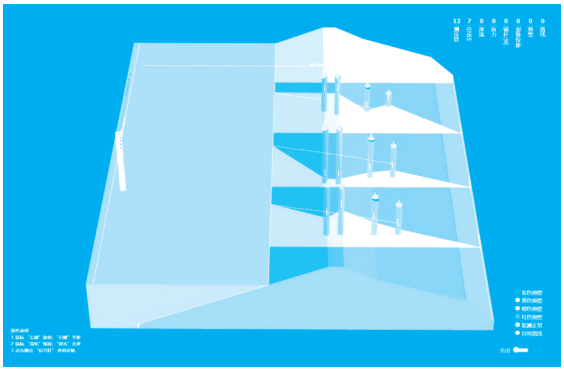

图5 三维大坝监测展示效果

4 结束语

本文提出的“LoRa+数字孪生”大坝安全监测系统，通过无线传感网络与高精度虚拟模型的协同，实现了大坝状态的实时感知、智能分析与精准预警。实际应用表明，该系统可显著提升水利工程的安全管理水平，并为智慧水利的推广提供了技术范式。未来研究将聚焦于：一是提升LoRa在极端环境下的抗干扰能力，保障极端天气下的LoRa通信的有效应用；二是提升模型精度和数据质量，从而提升孪生模型数据的可靠性，以应对更复杂的工程需求。

参考文献

[1] 刘杨,张李荪.基于5G+数字孪生的河湖安全系统在水利中的应用[J].江西通信科技,2023(3):45-47.DOI:10.16714/j.cnki.36-1115/tn.2023.03.013.

[2] 顾巍巍,王瑾,陈飞,等.基于UE引擎的数字孪生大坝安全监测系统[J].水利规划与设计,2024(5):75-77.

[3] 李秀文,王建,赵向波,等.大坝安全监测系统研究应用及智慧化提升[J].中国防汛抗旱,2022,32(12):53-57.DOI:10.16867/j.issn.1673-9264.2022193.

[4] 孙彬彬,薛彬彬.基于LoRa的小型水库大坝渗流压力监测系统的构建[J].吉林水利,2024(8):64-68.DOI:10.15920/j.cnki.22-1179/tv.2024.08.014.

[5] 童旭伟.LoRa无线通信技术在低功耗物联网设备中的应用与优化[C]//中国智慧工程研究会.2024智慧施工与规划设计学术交流会论文集,2024:16-18.DOI:10.26914/c.cnkihy.2024.027077.

[6] 张建伟,李毅男,张龑,等.基于数字孪生的水库大坝安全监测:关键技术与应用[J/OL].华北水利水电大学学报(自然科学版):1-8[2025-03-11].http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1432.TV.20250122.0915.002.html.

1009-0940-2025（2）-27-31

人工智能在消防救援装备中的应用探讨

周　锐　南昌市消防救援支队特勤大队　江西省南昌市　330000

摘　要：消防救援装备人工智能化是消防救援装备发展的趋势，其不仅可以提高抢险救援工作效率，更可以降低消防救援工作的风险性。本文就人工智能在消防装备中的应用展开了深入探讨。

关键词：消防装备　人工智能　技术应用

0　引言

消防救援队伍在执行抢险救援任务时常面临作战强度大、体力消耗严重且次生灾害风险高的挑战，例如地震救援中的余震威胁、火灾扑救时的建筑坍塌隐患，以及危化品灾害处置中的爆炸风险与有毒物质泄漏等问题。若消防救援装备能够应用最前沿的人工智能技术，实现对消防指战员在救援一线的全面替代，不仅能让救援人员远离危险环境，还能通过智能化装备的精准作业提升救援效率，增强救援安全性，从而更有效地保障消防救援人员及人民群众的生命财产安全。

例如，人工智能火焰识别系统融合深度学习、计算机视觉和模式识别等前沿技术，通过对火焰的形状、颜色、亮度等特征的分析，实现对火焰的自动识别和分类，同时借助实时报警弹窗功能，将火情信息直观展示给监控中心人员，提升了应急响应的效率，便于管理人员进行远程监控和指挥调度。

例如，无人机与物联网技术融合系统通过物联网卡建立无人机与地面控制站的通信链路，实现远程操控与任务执行，同时将无人机采集数据实时回传至云端，支撑数据共享与智能分析。若进一步融合卫星遥感数据（宏观灾情监测）、城市安防摄像头（火源追踪）及物联网传感器（环境参数采集）等多源信息，可构建灾害现场动态模拟系统，助力消防救援队伍精准掌握火情态势，显著提升应急作战的智能化水平。

再如，人工智能电动车棚消防灭火系统集成了先进的人工智能技术，实时监测电瓶车棚内烟雾、高温等异常情况。一旦检测到火灾隐患，立即启动喷淋装置扑灭火源，防止火势蔓延。同时，通过电话、短信、APP推送等多元化方式通知相关负责人，确保其能迅速采取行动。以2024年12月12日晚23:20左右南京市某单位电动自行车棚的火灾为例，当时一辆电瓶车起火，电动自行车棚泡沫喷淋智能灭火系统迅速启动，瞬间把火扑灭，避免了火势蔓延和更多的财产损失。这一成功案例充分证明了消防救援装备智能化程度越高，越能提高消防救援队伍战斗力，越能提高灭火救援质效，更好地保障消防指战员及人民群众的生命及财产安全。

近年来，很多具有一定智能化特点的消防救援装备已在消防救援队伍中投入使用，但是，这些装备仅处于智能化的初级阶段，相较于真正的人工智能技术，尚存在显著的差距。如在民间广泛应用的物联网技术，也尚未在消防救援队伍得到全面推广。特别是灭火侦察无人机，目前尚未实现与物联网技术的深度融合，因此其拍摄的影像无法实时传输至指挥中心后台。因此，消防救援装备的人工智能化有着巨大的提升空间，深入探讨和研发消防救援装备智能化的任务仍然任重道远。

1　消防救援装备人工智能化应用现状及存在问题分析

目前投入使用的智能化消防救援装备，在实际应用中，均表现出缺乏逻辑思维和自主行动能力，无法进行人机对话，无法独立完成灭火、抢险及救灾任务，所有动作均需依赖人员通过终端进行遥控。下面就消防救援队伍中广泛应用的智能化消防救援装备在实践中存在的问题进行剖析。

1.1 无数据采集计算及模拟能力的灭火机器人

灭火机器人由机器人本体、大流量水炮、防爆红外双视云台、手持遥控终端构成。主要用于应急处理大面积毒气与烟雾事故，实现对人员不易接近的火灾区域进行进攻扑救与掩护作业。目前装备的灭火机器人如图1所示。

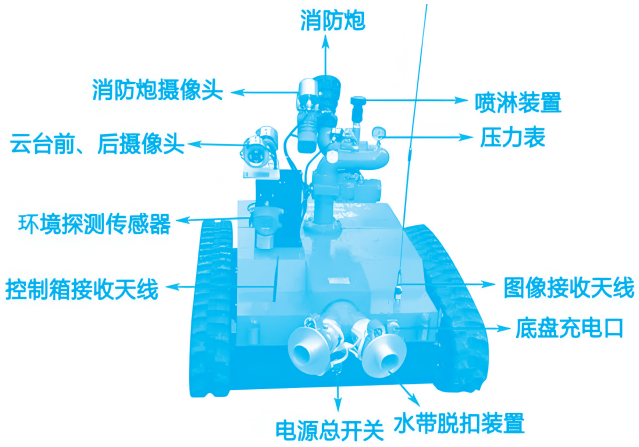

图1 灭火机器人

在实战应用中，灭火机器人虽然集成了众多前沿技术，但目前仍存在不会根据火情自行调焦、自行移动至最佳灭火地点、自行调整水炮角度且因没有连接消防车终端而无法自主调整消防车出水压力等局限性，这些限制导致机器人所有动作均依赖操作人员通过无线终端远程遥控，影响到了其实战能力和效率，难以满足应急管理理论中“快速响应、智能决策”的实战要求。

2022年5月31日上午浙江省绍兴市上虞区化工园区某公司新建车间火灾事故中，灭火机器人虽在专业人员操作下迅速控制火势，但依赖远程遥控的特性使其在复杂环境下的应用潜力受限：复杂现场中灭火机器人需躲避障碍物易失衡而延误救援时间，远程遥控定点水炮位置或调整角度费时费力，不如指战人员穿戴防护装备直接操作迅速，其高压水炮、有毒气体检测等复杂功能模块需依赖操作人员实时决策，若操作人员经验不足或现场通信中断会直接影响效能，且灭火机器人行动能力受爆炸风险、高温区域等复杂火场环境限制，传感器和机械结构在极端条件下可能故障或误判，火灾现场浓烟、化学物质泄漏等还会干扰其导航和探测系统。

1.2 无数据采集计算及模拟能力的排涝机器人

排涝机器人由履带（或车轮）底盘行走模块、发动机模块、信号收发及处理模块、液压控制执行模块及排涝泵水模块组成。信号收发及处理模块接收操作终端指令后，即指挥履带（或车轮）底盘行走模块驱动机器人至指定位置，随后启动液压控制执行模块和排涝泵水模块进行抽水作业。现在装备的排涝机器人如图2所示。

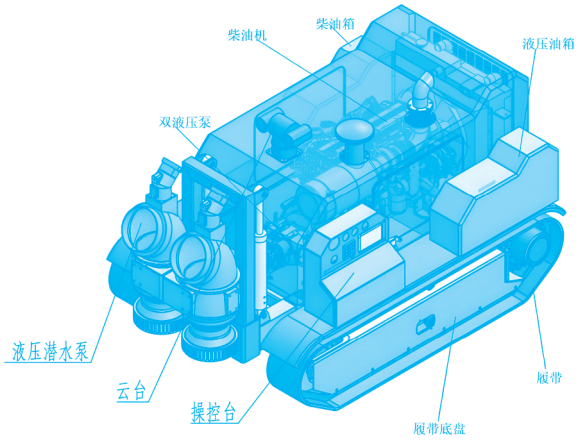

图2 排涝机器人

在实战应用中，由于缺乏数据采集计算及模拟能力，该排涝机器人无法自动识别周围环境，无法自主到达稳定工作区域，也无法确保底部与地面的良好接触，更无法根据实际需求自行调整泵浦转速、斗杆速度和角度等参数。尽管精密电机的应用，使消防机器人能够执行一系列运动控制，例如水泵开关控制和喷水角度控制，但这些任务的完成需要依赖操作人员通过无线终端远程遥控。因此，在实战中，该排涝机器人常会遇到一些问题，仍需人员涉水进行处理，尤其是由于其缺乏自测、自检、自修功能，一旦出现故障，就需要及时进行人工排除。例如，排涝机器人陷入淤泥时需要人去清除；水泵被杂物堵塞时需要人去清理；工作时出现电机故障、推进器损坏、传感器失灵需要及时修理。在水下或复杂环境中，无线通信信号容易受到衰减和干扰，导致通信距离短、传输速率低、信号稳定性差，使得操作人员不得不靠近作业；水带铺设、运动过程中障碍物清除，人仍可能需涉水涉险；水泵堵塞或抽空情况需要人员判断。

1.3 无数据采集计算及模拟能力的消防无人机

消防无人机由自主飞行控制系统、姿态传感器系统、动力系统、数字云台、遥控操纵系统和数据接收系统组成，有无人直升机、固定翼机、多旋翼飞行器、无人飞艇和无人伞翼机等。其作用为：利用高清摄像和红外热像仪进行火场侦查，帮助指挥员了解火情和判断火势蔓延趋势；实时监控火场情况，并将视频和数据传回指挥中心，以便及时调整战术和救援方案；利用热成像技术探测火源和热辐射区域，帮助消防人员定位火点，制定针对性的灭火策略；携带救援物资如医疗包、安全绳索等，直接投放到被困人员所在区域，解决紧急需求；在地面通信受阻时，作为空中基站，保障指挥中心与一线救援力量之间的通信畅通。消防无人机工作原理如图3所示。

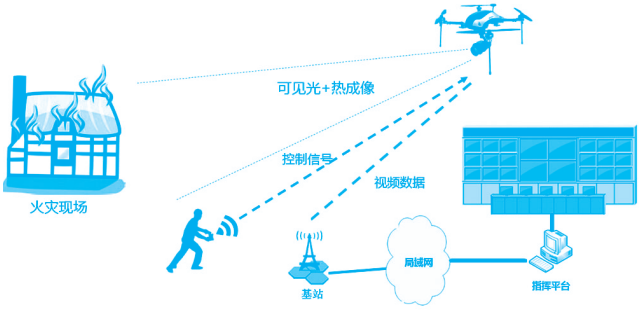

图3 消防无人机工作原理

实战中，受限于较低的模拟能力，该消防无人机的智能化功能主要集中于避障，其余动作均需操作人员通过遥控电控来指挥完成，这极大地限制了其在火场中的应用。

首先，消防无人机拍摄的影像不能直接传输到指挥中心后台，影像传输需要在消防无人机飞行返回后取出储存卡通过电脑传输或在消防无人机返回通过电控、开通账号与指挥中心后台相连，使用流量传输。这样操作，指挥中心人员不能及时得到实时影像并分析判断火情，作出有效决策。电控中的影像非常不清晰，不利于现场火情分析。摄像机像素可达9M，而传输到电控中的图像则为300K，两者像素相差30倍，其清晰度还不如一英寸照片放大一倍的效果，操作人员根本无法通过电控屏幕准确判断火情供指挥人员决策，其效果远不如现场指挥人员现场观察火情直接准确、快捷。

第二，消防无人机的避障系统缺陷大。飞行中遇到障碍物或狭小空间时，由于避障系统的限制，消防无人机往往会停止前进，而非自动绕行或穿越。如果需要避障前行或穿越狭小空间，需要关闭避障系统，完全靠人工通过观察电控屏幕并遥控其前行。在消防无人机穿越狭小空间比赛时，经常会出现消防无人机撞断机翼的情况。而在灭火救援过程中，使用消防无人机侦察，穿越狭小空间是常态，如大跨度厂房火灾、地震救援、森林搜救，就需要消防无人机进入救援现场搜索被救援人员或抵近火灾现场观察火情，如果操作人员关闭避障系统遥控消防无人机绕过障碍物或穿越狭小空间时出现折翼情况，就会耽误最佳作战时机，影响作战效果。

第三，消防无人机因受热辐射的影响及钢结构屏蔽作用的干扰，很容易失控，不能进入建筑物内部进行搜救及观察火情。操作实践表明，建筑物火灾从起火到火灾蔓延，约10～15分钟，火场温度会急剧上升至400℃，而目前市面上的消防无人机耐温能力通常在200℃左右，消防无人机进入建筑内部很容易烧毁，另外，因热辐射会产生电磁波，此电磁波会严重干扰电控与消防无人机的连接，使得电控与消防无人机不能相互接收各自发送的信息，电控无法接收消防无人机发送的信息，也无法对消防无人机发出指令。大跨度的钢结构厂房，因金属对信号有屏蔽作用，消防无人机如果进入，则会因屏蔽作用而使电控与消防无人机失去相互接收信号的能力。

最后，风力与气压变化可能导致无人机飞行稳定性下降，进而影响拍摄画质与定位精度，最终对救援效果产生不利影响。从实践来看，当前国内性能最优的无人机抗风能力为7m/s，若风速超过这一阈值，无人机便会出现飞行不稳的情况。

1.4 有一定人工智能化的消防安全讲解机器人

安全讲解机器人针对不同人群（如儿童、成人），根据不同场景（如学校、社区、企业）有针对性设置专业消防知识库，提供定制化讲解内容。如高清屏幕播放火灾案例视频、逃生演示动画等，将抽象知识转化为直观体验，同时结合一定声光效果吸引公众注意力，达到强化宣传效果的目的。有的安全讲解机器人则采用了语音识别与自然语言处理技术实现人机对话，人机可以实

时问答互动。同时依托大数据与云计算技术，依据用户提问实时调整数据，广泛搜集并筛选网上既有趣又准确的消防安全知识，以生动、直观的方式展现给参与者，有效提升公众参与度。

还有的安全讲解机器人则设置了日常巡查和语音播报功能，在高温天气下，通过卫星导航和避障雷达实现自主移动，以及在后台操作人员的控制下能在复杂地形中自行移动并避开行人障碍，并利用4G/5G或Wi-Fi等无线通信技术将摄像数据远程传输到控制后台，后台人员根据收到的摄像数据进行分析是否存在火灾隐患，一旦发现火灾隐患，则及时开启语音播报系统，提醒业主进行隐患排查整改，从而提升基层火灾防控效率。

在实际应用中，因其没有人的思维能力及思维模式，不能自行突破设定场景，形成新的讲解内容，如果没有人为升级，其内置内容便不会更新，其内容就有可能会滞后于社会经济的发展，跟不上科学技术及城市发展的需要。在人机互动过程中，由于安全讲解机器人缺乏人类的思维能力，当遇到网络上未覆盖的问题时，便无法给出准确的解答。

2 消防救援装备人工智能化应用的思考

2.1 智能化的消防救援装备必须具备四种能力

综上所述，目前消防救援装备的智能化仍停留在半人工智能状态，并没有完全具备高动态运动与环境适应能力、自主决策与学习进化能力、精细化操作与任务执行能力、人机协作与系统兼容能力。这四种能力正是消防救援装备智能化存在的必要意义，装备没有这四种能力，就不能称作智能化装备。

消防救援装备的人工智能化需从四方面强化能力建设：一是配备多模态传感器，让消防机器人能够自主导航楼梯、障碍物等复杂地形并维持动态平衡，同时实时感知环境以完成跳跃、攀爬等高危动作；二是集成强化学习算法，从传统Model-based模式转向Learning驱动的强化学习，结合人工智能大模型构建“感知—决策—执行”的闭环控制体系，通过模仿人类救援行为持续优化任务执行策略；三是开发灵巧手部结构，借助强化学习等技术训练其自主执行任务的能力，使其具备独立思考能力，像消防指战员一样高效完成灭火救援工作；四是拓展机器人在驱动器控制、传感器数据融合、图像处理、模式识别等方面的功能，使其既能兼容现有人类基础设施、无缝融入救援环境，又能通过云端协作实现多机器人任务分配与协同作业，促进人机之间、机器人与外部环境之间及机器人彼此之间的信息交互，共同完成救援任务。具备四种能力的人工智能化消防救援装备工作原理如图4所示。

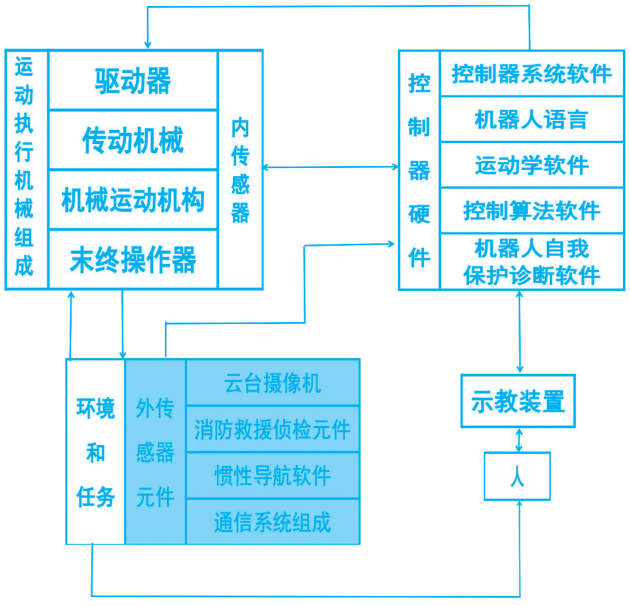

图4 具备四种工作能力的人工智能化消防救援装备工作原理

消防救援装备人工智能研发人员依据图4架构打造智能装备，使其具备视觉识别、环境感知、精准灾源定位及自主导航至战斗位置的能力；同时借助边缘计算与5G通信技术，实时传输灾害三维建模数据，按分配任务独立思考决策，在复杂环境中自主完成各类消防救援任务，真正实现替代消防指战员进入高危环境执行灭火救援战斗，高效高质完成各项作战任务的目标。

2.2 先进的人形机器人已具备应有的四种能力

从已面世的人形机器人来看，先进机型均具备上述核心能力。以特斯拉擎天柱第二代（Optimus Gen-2）为例，其搭载的执行器与传感器、2自由度驱动颈部、响应更快的11自由度灵巧手、十指触觉传感器、集成电子和线束的执行器、足部力/扭矩传感器及铰接式脚趾等

配置，使其在具备视觉识别、物体分拣、机体平衡等基础能力的同时，更实现了运动与控制层面的突破——能完成行走、平衡维持、精细操作及环境感知等动作，且十指均配备触觉感应功能，显著提升了操作的灵活性与精确度。而波士顿动力最新的Atlas机器人则借助先进的强化学习与动作捕捉技术，通过捕捉人类或其他模型的运动轨迹并进行自我学习优化，实现了高度类人的自然灵活动作，如自主完成跑步、翻筋斗、侧翻及霹雳舞等动作，其流畅度已接近人类水平。

2.3 实现智能化消防救援装备四种能力的途径

对于消防救援装备人工智能化而言，若要开发具备视觉识别、环境感知、精准灾害定位、自主导航至战斗位置、独立思考决策及在复杂环境下完成各类消防救援任务等功能的智能装备，关键要点如下：

首先，需基于现有装备智能化基础，深入研究消防救援人员在灭火救援中对灾害现场情况的思考逻辑，对各类灾害成功处置案例进行学习、分析与总结，从而得出灾害处置的最佳工作方式、装备器材及救援力量选择，并将该研究结果作为开发智能软件和系统的核心要素，使机器人能通过示教装置自我学习成功案例，实现对灾害现场的自觉观察、分析与推理，进而得出精准灾害数据，自动生成最佳处置预案并反馈给现场指挥人员。

其次，通过集成机器视觉、智能控制、传感器技术和机器学习等关键技术，尤其是引入数字孪生技术构建虚拟火场，利用强化学习算法优化装备操作训练流程，让机器人能够模仿消防指战员作战时的运动轨迹与精细动作。如此一来，当控制人员发出作战指令后，机器人可自觉以最佳方式在最危险前沿处置灾害，更智能地执行任务，提升救援效率与安全性。

2.4 消防救援装备智能化发展的关键要素

一是智能化技术要融合统一。消防救援装备智能化长期止步不前，关键原因就是生产商各自为战，小打小闹。没有集中有限资金进行灾害环境数据的标注、研发作战样本，没有开发具备群体智能的消防装备GPU集群，建立大型模型训练所需依赖的超算中心，没有统一学习模型，导致现有装备难以具备视觉识别、自主决策等核心能力。二是智能化装备接口协议与数据格式要统一标准，否则跨品牌装备间的协同作业将面临挑战。三是要构建消防专用数据库，通过合成数据生成技术扩充训练样本。要建立统一的数据标注规范和知识库构建标准，推动跨区域数据共享与模型训练协同。要整合互联网公开资源、政务外网消防业务数据、应急指挥网调度信息等，通过多模型架构实现异构数据的深度融合，构建覆盖消防全场景的基础数据池。

3 结束语

消防救援装备人工智能化是消防救援装备未来发展的必然趋势，并将呈现“感知—决策—执行”全链条升级。未来五年，随着边缘计算、多模态大模型等技术的成熟，智能装备有望实现从辅助工具到战略核心的角色转变，推动消防救援行业进入“精准化、无人化、可持续化”的新阶段。

参考文献

[1] 蔡自兴,刘丽珏,陈白帆,等.人工智能及其应用(第7版)[M].北京:清华大学出版社,2024.

[2] 张慧,叶玲,柯文莉.城市数字化转型:智慧排水信息化监控平台建设[J].上海信息化,2022(11):26-29.

[3] 段永利.中信重工开诚智能:做机器人中的最美"逆行者"[J].科技创新与品牌,2023(2):64-66.

[4] 杨洸,宋旭.空地协同网络在森林防火应急通信中的设想[J].通信电源技术,2020(5):189-191.

[5] 北京商报综合报道."长坡厚雪"赛道?特斯拉二代机器人来临[N].北京商报,2023-12-14(8).

1009-0940-2025（2）-32-34

虚拟现实、物联网和DeepSeek的融合创新应用

张国文[1、2] 刘 杨[1、2] 张李荪[2] 肖志鹏[2]
1中铁水利水电规划设计集团有限公司 江西省南昌市 330029
2中铁水利信息科技有限公司 江西省南昌市 330209

摘 要：本文提出了一种基于虚拟现实（VR）、物联网（IoT）和人工智能大模型（如DeepSeek）的智能水利工程数字孪生系统。该系统通过“虚实映射—智能分析—动态优化”的闭环架构，实现了水利工程的“四预”（预报、预警、预演、预案）功能，为防汛抗旱提供了全链条智慧化解决方案。通过虚实交互与方案优化，系统在虚拟环境中模拟调度方案效果；通过智能生成与动态调整机制，系统自动生成并优化应急预案。实现全自动防洪抗旱响应，成为全球水资源管理的标杆范式。

关键词：VR IoT DeepSeek 数字孪生 “四预”功能

0 引言

随着全球气候变化的加剧和城市化进程的快速推进，水利工程面临着诸多前所未有的复杂挑战。极端天气事件频繁出现，导致洪涝灾害和水资源短缺问题愈发严重，给社会经济和人民生活带来了巨大威胁。传统的水利管理模式主要依赖人工经验和分散的数据收集与分析，这种模式在面对复杂多变的现代水利问题时，难以实现精准预测和及时有效的动态响应，无法满足现代社会对水利工程高效、智能管理的需求。在此背景下，数字孪生技术结合VR、IoT与人工智能大模型（如DeepSeek），构建了新一代智能水利工程系统。该系统通过“虚实映射—智能分析—动态优化”闭环，实现了水利工程的“四预”（预报、预警、预演、预案）功能，为防汛抗旱提供了全链条智慧化解决方案[1]。

1 技术架构与核心要素

智能水利工程数字孪生系统的核心架构分为四层，各层紧密协作，共同实现系统的高效运行与强大功能。

1.1 感知层

感知层是整个系统的基础，依托IoT设备实时采集各类数据。具体而言，水位计、流速仪、气象站等设备分布于水利工程的关键位置，能够精准获取水文、气象以及工程结构的实时数据。例如，在河流沿岸布设高精度水位计，可每分钟更新一次水位数据，为洪水预警提供及时依据。同时，无人机也被广泛应用，其搭载的高清摄像头和传感器，能够对水利工程的偏远区域进行巡检，获取工程设施的外观状况和周边环境信息。这些设备采集的数据通过5G或北斗卫星导航网络高速、稳定地传输至云端，确保数据的实时性和完整性，为后续的分析与决策提供坚实的数据基础。

1.2 平台层

平台层基于强大的分布式计算平台，如天河超算平台，实现数据的清洗、存储与并行计算。该平台具备极高的计算能力和海量数据存储能力，能够处理来自感知层的海量、多源、异构数据[2]。在数据清洗环节，通过智能算法识别并剔除异常数据和噪声数据，确保数据质量。例如，对于气象站采集的气温数据，平台能够自动识别并修正因设备故障导致的异常高温或低温数据。在数据存储方面，采用分布式存储架构，将数据分散存储于多个节点，不仅提高了数据存储的可靠性，还便于后

续的快速读取和分析。此外，平台支持万亿参数大模型的训练，为构建复杂、精准的水利模型提供了强大的计算支撑，使得系统能够高效处理大规模数据集和复杂的模型训练任务。

1.3 模型层

模型层是智能水利工程数字孪生系统的核心，构建了专业的水利大模型，如Hydro-LLM。该模型融合了物理机制和深度学习算法，结合DeepSeek的多模态理解能力，能够实现对洪水演进、旱情预测等复杂场景的精准建模。具体来说，物理机制方面，引入了圣维南方程组等经典水力学方程，确保模型对水利工程的物理过程有准确的描述[3]。例如，在模拟洪水在河道中的演进过程时，圣维南方程组能够精确刻画洪水的流速、流量等物理参数的变化规律。深度学习算法则赋予模型强大的数据驱动预测能力，通过对海量历史数据的学习，模型能够自动提取数据中的潜在规律，用于预测未来的水情变化。例如，基于深度学习的降雨—径流关系模型，能够根据气象数据和历史降雨—径流数据，精准预测降雨后的径流变化，从而为洪水预报提供重要依据。DeepSeek的多模态理解能力进一步增强了模型对复杂场景的理解和分析能力，使其能够处理文本、图像、视频等多种类型的数据，为水利工程的全面分析和决策提供支持。

1.4 应用层

应用层通过VR/AR技术构建三维可视化交互界面，结合混合现实（MR）沙盘，为决策者提供沉浸式的交互体验。例如，在防汛调度方案预演过程中，决策者可以通过VR设备进入虚拟的流域环境，直观地观察洪水演进过程和不同调度策略的效果。同时，MR沙盘能够将虚拟的数字孪生模型与现实场景相结合，决策者可以在沙盘上直接操作，模拟不同的调度措施，实时观察其对洪水演进和水利工程设施的影响。这种沉浸式的交互方式不仅提高了决策的科学性和准确性，还增强了决策过程的直观性和可操作性，使决策者能够更好地理解和评估各种方案的优劣，从而做出最优决策。

2 “四预”功能的实现路径

2.1 多源数据融合与动态建模预报

预报是智能水利工程数字孪生系统实现精准预测和提前准备的关键环节。通过多源数据融合与动态建模，系统能够对洪水、干旱等水情变化进行高精度预测，为后续的预警和调度提供重要依据。

洪水预报是智能水利工程数字孪生系统中的重要功能之一。系统整合了多种数据源，包括气象卫星（如FY-4A）、雷达回波、地面传感器等，这些数据源能够实时提供降雨、水位、流速等关键信息。基于Transformer架构构建的降雨—径流关系模型，能够精准模拟降雨与径流之间的复杂关系。该模型通过学习历史数据中的降雨—径流模式，结合实时气象数据，将洪水预见期从传统的72小时延长至120小时，纳什效率系数达到0.89。这一显著提升的预见期和高精度预测能力，为防汛决策提供了更充裕的时间和更可靠的依据，能够有效降低洪水灾害带来的损失。

干旱预测同样是该系统的重要功能。系统融合了标准化降水蒸散指数（SPEI）和土壤含水量遥感数据，构建了时空图卷积网络（ST-GCN）。该网络能够综合考虑降水、蒸发、土壤湿度等多因素对干旱的影响，通过时空图卷积操作，捕捉干旱在时间和空间上的演变规律。在华北平原的实际应用中，干旱预测精度提升至85%。这一高精度的干旱预测能力，使得相关部门能够提前采取抗旱措施，优化水资源配置，减轻干旱对农业生产和生态环境的影响。

2.2 智能评估与分级响应预警

预警功能是智能水利工程数字孪生系统实现提前防范和快速响应的重要环节。通过智能评估与分级响应机制，系统能够及时发现潜在风险，并根据风险等级采取相应的措施[4]。

山洪动态预警模型结合了传统的水文模型和先进的神经网络技术，能够实时模拟山洪的形成和演进过程。通过物理约束神经网络，模型能够自动学习和校准参数，确保预测结果的准确性和可靠性。系统能够在15分钟内完成临界雨量的计算与预警。这一快速响应能力，为山区居民和相关部门提供了宝贵的预警时间，能

够有效减少山洪灾害带来的人员伤亡和财产损失。

设备故障预警模型能够自动学习坝体渗流数据中的特征模式，通过注意力机制聚焦于关键数据点，从而精准识别渗流异常。在实际应用中，模型的识别精度达到0.05mm。一旦发现渗流异常，系统会自动联动VR界面，为维修人员提供直观的故障位置和相关信息，指导维修人员快速排查故障。这种智能化的设备故障预警机制，不仅提高了设备的运行可靠性，降低了维修成本，缩短了维修时间。

2.3 虚实交互与方案优化预演

预演功能是智能水利工程数字孪生系统实现科学决策和优化调度的重要环节。通过虚实交互与方案优化，该系统能够在虚拟环境中模拟各种调度方案的效果，为决策者提供直观的参考依据。该系统基于数字孪生流域模型，构建了MR指挥沙盘。通过MR指挥沙盘模拟不同调度策略对洪水演进的影响，决策者能够在虚拟环境中直观地观察洪水的演进过程和调度措施的效果。这种沉浸式的预演方式，不仅提高了决策的科学性和准确性，还增强了决策过程的直观性和可操作性。

2.4 智能生成与动态调整预案

预案功能是智能水利工程数字孪生系统实现高效应急响应和科学调度的重要环节。通过智能生成与动态调整机制，系统能够根据实时数据和预测结果，自动生成并优化应急预案。

应急调度模型系统采用多智能体强化学习（MARL）生成水库群联合调度方案。通过该模型动态调整梯级水库的蓄放水量，该模型能够综合考虑多个水库之间的协同调度，优化水资源配置，提高抗旱能力。

人工智能辅助决策系统结合DeepSeek和RAG技术，自动生成涵盖风险预警、调度影响的图文报告。报告生成时间较原先缩短60%，为决策者提供了快速、准确的决策支持。通过人工智能辅助决策报告，决策者能够及时了解当前水情、风险状况和调度方案的影响，从而做出更加科学合理的决策。

3 挑战与对策

3.1 数据与模型瓶颈

智能水利工程数字孪生系统在数据与模型方面面临着诸多挑战。一方面，水利数据具有多源性、异构性和时空分布不均匀等特点，数据的采集、整合与共享难度较大。例如，在一些偏远山区或小型水利工程中，数据采集设备的布设不够完善，导致数据缺失或不完整，影响了系统的整体性能。另一方面，模型的精度和泛化能力有待进一步提高。在面对不同地区、不同类型的水利工程时，模型需要具备快速适应和准确预测的能力，但目前在一些历史灾例稀缺的地区，模型的训练和优化面临较大困难。

3.2 安全与伦理风险

随着智能水利工程数字孪生系统的广泛应用，数据安全与伦理问题日益凸显。数据隐私是其中的关键问题之一。在跨区域数据共享过程中，涉及大量敏感信息，如水库的水位、流量等数据，一旦泄露，可能对水利工程的安全运行造成严重影响。此外，算法的可解释性也是一个重要的伦理问题。复杂的机器学习和深度学习模型往往被视为“黑箱”，其决策过程难以理解，这在水利工程的关键决策中可能会引发信任危机。

3.3 跨部门协同障碍

智能水利工程数字孪生系统的建设和应用涉及多个部门，如水利、气象、应急等。然而，目前各部门之间的协同合作还存在一些障碍。不同部门的数据标准和格式不统一，导致数据难以共享和整合。此外，各部门之间的职责分工和工作流程也存在差异，缺乏有效的沟通和协调机制，影响了系统的整体效能。

4 结束语

智能水利工程数字孪生系统通过VR、IoT与DeepSeek的深度融合，实现了从数据感知到决策优化的全链条智能化。其核心价值在于以“虚实共生”提升水利系统的韧性、效率与可持续性。随着技术迭代与政策支持，开发具备在线学习能力的水利工程集群智能体，实现全自动防洪抗旱响应。未来或可通过VR直接接收人脑指令，实时调整数字孪生模型参数。这一系统有望成为全球水资源管理的标杆范式，为人类应对极端气候与生态危机提供关键支撑。

（下转第51页）

1009-0940-2025（2）-35-38

数据中台赋能的校园智慧平台架构设计与应用研究

曾从良　联通数字科技有限公司江西省分公司　江西省赣州市　341000
王　玓　联通（江西）产业互联网有限公司　江西省南昌市　330096

摘　要：以5G、“云大物”（云计算、大数据、物联网）等新技术为支撑搭建数据中台，对业务系统数据进行收集、清洗、转换，实现统一数据标准与使用监管，提升数据质量。通过全量数据汇集治理、开发及互联互通，打破数据割裂、缺失及杂乱等问题，实现跨域数据交换共享，形成标准统一、治理精准、共享便捷、使用安全的全量数据资产，助力学校打造“数据可用、会用、好用”的校园智慧大脑。同时，应用数据处理算法构建分阶段、分类型、多主题数据集，满足决策支持、数据价值发现、业务数据支撑等需求，推动智慧校园向更智能化方向发展。

关键词：5G　物联网　智慧校园 大数据　数据中台　校园智慧大脑

0　引言

高等教育是信息化建设的主战场，高校信息化代表着信息化的前沿阵地。根据高校的发展和定位，结合信息化建设的实际情况，校园智慧大脑总体目标是围绕以数据为核心，实现已有数据的可管、可用，打通各个业务系统的数据鸿沟，通过数据治理和数据清洗，建立统一的数据标准、处理能力，以及规范接口标准、数据结构标准和交换标准，彻底解决数据孤岛和数据壁垒问题，以“大中心、大平台、大系统”的总体思路构建校园智慧大脑。

1　校园信息化现状与问题

近年来，我国高校的信息化建设取得了很大成效，具备完善的基础网络、计算机硬件资源和丰富的软件应用。随着大数据的广泛应用及全国高校数字化校园的持续开展，大数据、云计算、移动互联等新兴技术普及，学校信息化的理念也逐渐从管理转向服务，学校信息化建设和师生对数据完整性、准确性、及时性和一致性提出了更高的要求。

早期“粗放式”发展模式下，各系统间缺乏数据共享与交换，系统自身难以及时更新数据以维持准确性，“数据烟囱”与“信息孤岛”问题突出，由此引发的重复数据多次采集、数据不一致、数据错误及更新不及时等问题，严重影响系统间正常运行与部门协作效率。而大数据的挖掘与使用将为学校治理与发展注入强劲动力，通过科学的数据规划与管理，建立完善的数据治理、维护和服务体系，发挥数据在事件预测、辅助决策中的作用，正成为当前高校信息化建设的重点发展方向。

2　研究方向和内容

《教育部2022年工作要点》着重强调，在数据基础建设层面要实现“一数一源”，打通数据壁垒以充分发挥数据效能；在提升数据治理、政务服务和协同监管能力上，通过强化数据挖掘与分析，构建基于数据的教育治理新模式。

丰富的信息化应用系统满足了学校日常的教学、管理、生活等方方面面的需求，有力地保障了学校的高效运转和能力提升。但已建系统多数是“烟囱式”的独立业务系统，数据不能共建共享和互联互通。如何将沉睡在各个独立系统中的数据唤醒、利用起来，从而提高学校管理水平、提升学习效率，便成为一个颇有挑战性的

课题。

大数据、5G、物联网、数据中台和数据湖、数据仓等新兴技术的蓬勃发展，为迎接这种挑战和打造更智慧化的校园提供了可能，为教育高质量发展注入新动力。

本研究依托高校数据中台，推动学校数据资产从数字化向智能化升级，在统一标准、明确质量、开放共享、权责清晰、数据安全保障等方面实现突破提升，解决数据资产运用效能低下、智慧校园功能滞后等深层次矛盾。数据生命周期是指数据从产生到消亡的全过程，通常涵盖数据采集、传输、存储、处理、共享及销毁等阶段，具体如图1所示。

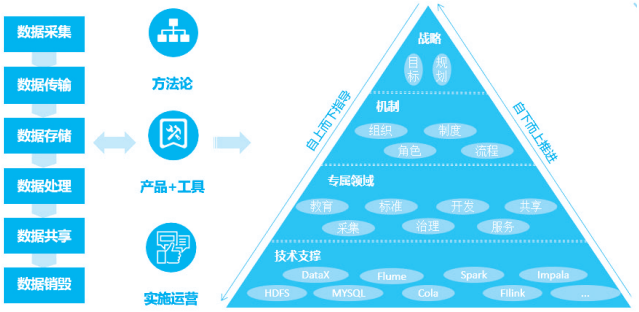

图1 数据生命周期

2.1 主要研究方向

(1) 数据采集、清洗、挖掘和分析方法研究，以及研究数据驱动业务应用开发、数据安全与隐私保护等技术

基于大数据管理、计算及应用开发等技术，对各类数据源实施采集、存储与处理，研究数据采集清洗技术、挖掘分析方法及共享交互机制，在保障数据安全与隐私保护的前提下实现有效共享，最终形成标准、规范、安全的数据资产。

(2) 数据处理算法、数据共享和交互机制研究

主要研究全量数据汇集治理、数据计算开发和数据互通共享等方法技术。它涉及多方面和多层次的需求，包括对接学校已有或拟建业务系统，对业务系统产生的数据进行有效收集、清洗、转换，实现统一的数据标准及数据安全监管，提高数据质量。重点研究实时、高效的数据处理算法，实现各阶段、分类型、多主题数据集，满足决策支持、数据价值发现、业务数据支撑等需求。

(3) 构建校园智慧大脑

根据学校业务需求完成建模及深度的数据挖掘分析，实现基于多种管理模式与育人、成才并存的学生精准化和专业化管理，从而构建出校园智慧大脑。提供丰富的API接口，输出校内学生相关信息资源、机器日志数据与第三方互联网数据，为高校提供科学高效的数据服务。

2.2 研究内容

2.2.1 搭建数据中台

(1) 数据治理

数据治理核心在于通过治理将资源变成资产、治理提升质量、通过治理形成不同用户视角的数据地图，释放数据价值。

数据治理包括数据采集管理、数据质量管理、数据标准管理、主数据管理、元数据管理及数据资产管理。通过数据治理，确定数据权威性和唯一性来源，同时对数据质量进行检测，推动业务数据源头的数据质量持续改进，解决数据割裂、数据孤岛、数据缺失的问题，形成标准更统一、治理更精准、共享更便捷、使用更安全的全量数据资产。数据中台将数据安全贯穿数据从生产到应用全生命周期，通过对数据的安全分级及脱敏规则配置，从而保障数据从采集、加工、计算、开放、共享及销毁的全流程安全性。

(2) 数据开发

提供数据二次开发及数据开放服务，强化数据挖掘和分析。利用大数据开发和人工智能分析技术，提炼数据价值，探寻数据间隐藏的因果关系，挖掘隐藏信息对教育教学管理的影响，为科学决策提供数据基础。建立合理的数据开放服务，快速赋能上层应用。

(3) 数据共享交换

将经过治理和开发后的数据资产在安全保护、统一规范、分级审批等全面的监控下，供各个部门之间高效的共享、流通和利用，消除数据孤岛，减少数据重复填报，从而让数据多跑路，用户少跑腿。建立数据集市，提高数据共享交换能力，基于数据安全规范，统一维护管理数据资源，全程数据交换管控，保障数据安全、合规地在各部门间和校内外共享流通。

(4) 数据资产中心

建立数据资产中心，提供数据治理过程及治理成果展示，同时作为数据开放共享的载体。构建数据资产全景图，提供关键性指标及治理后数据资产的可视化展示。通过数据可视化大屏，能够展示数据治理、数据质量、数据安全、数据资产中心、运维监控等内容，提供数据集市服务，公开数据资源目录，清晰数据权属关系，有效促进数据的共享交换。

2.2.2 大数据校园智慧大脑

(1) 学生成长画像

对在校学生个人信息和行为信息关联分析，构建每个学生的多维度评测模型，综合各维度的数据开展学生个人行为画像和综合画像。

◎ 个人画像：为每位学生各类行为和数据打上标签，展示学生个人与群体的关系，以及上网、消费、图书借阅、学业、奖惩不同维度的分析，输出综合素质分析报告和发展建议，老师可根据每个学生的差异情况提供个性化的管理和教学服务。

◎ 群体画像：根据特定筛选条件，可以查询班级的整体或局部画像，协助辅导员、管理员合理调整班级专业的培养方向。也可以查看学院整体画像，加强学校领导对学生整体状况的把控和管理，根据每个班级或年级或学院实际情况优化学生管理措施。

(2) 学生安全预警

基于大数据的人工智能模型算法，生成学生离校、超时未归、失联等预警信息并自动推送，使管理人员可以提前介入，防患未然。可以预测预警事件的走势，清晰展示预警类型和预警数量的排名等情况。

(3) 学生成长预警

建立成绩预测的算法模型，结合预警配置中的阈值，对学生的课程挂科情况和历史累计挂科、学分、GPA值、违纪处分进行统计分析，生成学生学业、肄业预警信息并自动推送，管理人员可以提前介入学生成长预警异常情况处理。

(4) 数据辅助决策

打造学校专属算法模型，如多元回归算法提供成绩预测，逻辑回归算法帮助精准资助，MAD（Median Absolute Deviation，绝对中位差）算法助力失联预警等等。覆盖学生学习、校园生活、校园安全、贫困资助等多方面，有效配合学校发现问题、分析问题、解决问题，推进学校精细化管理，协助学校更好地办学，更好地服务于师生、社会。

(5) “领导驾驶舱”

“领导驾驶舱”为领导和管理者提供数据展示仪表盘和 望塔，将校园纷繁的海量数据进行汇总、分析、提炼、处理，实时、准确地展示学生生活、学习、社交等情况，为智慧校园管理提供大数据信息支撑及服务。“领导驾驶舱”可为校领导、学工领导、辅导员和预警信息等不同维度的驾驶舱视图。

3 技术实践路线

通过将数据中台作为数字化校园的数据底座，利用大数据技术对学校教育信息化发展过程中的海量数据进行汇聚整合、清洗加工，统一标准口径，从而建设各业务主题域的资产数据，再通过对资产数据的快速封装，对外提供接口服务及数据共享交换，形成完整高效的数据管理闭环，提升数据准确性、可用性、有效性及复用性。如图2所示。

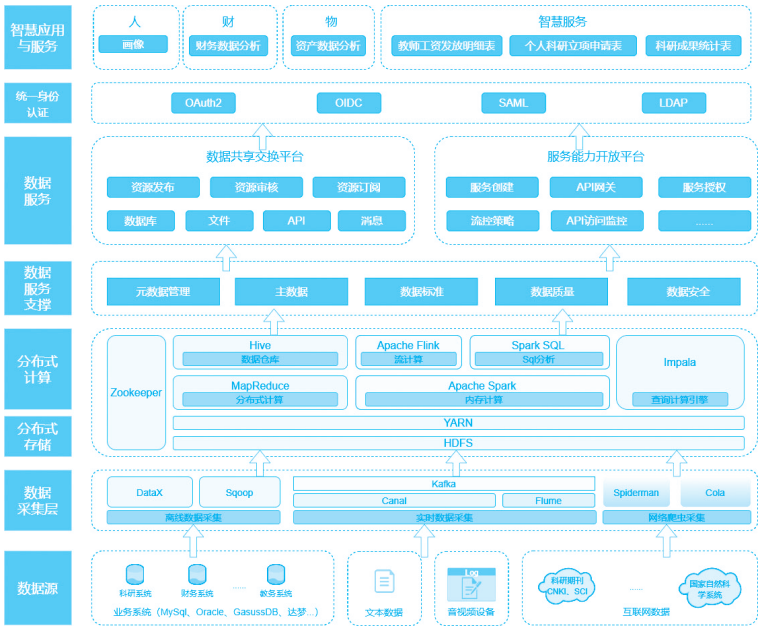

图2 技术实践路线

3.1 数据采集和清洗技术

采用5G+物联网平台、Web爬虫、ETL工具、数据清洗脚本等高效、可扩展、可定制技术，对各类数据源进行统一采集和清洗，结合数据规范和校验机制，确保数据的质量、脱敏和安全。

3.2 数据存储和处理技术

采用湖仓一体化存储处理技术，借助Hadoop、Spark、HBase等构建大数据集群、数据仓库及湖仓一体化系统，实现大规模数据的存储与分析。针对业务数据，通过数据采集模板将各业务库数据采集至Hadoop生态中Hive数据仓库的原始库；Hive数据仓库运用分布式计算，构建原始库、标准库和主题库，并在HDFS上存储多副本，以此保障数据的可靠性与安全性。

3.3 数据挖掘和分析技术

利用机器学习、人工智能、数据挖掘等技术，对各类数据进行深入挖掘和分析，提供多样化的数据统计和分析报告，帮助学校进行决策和优化。

3.4 数据共享和交互技术

建设数据开放平台，明确接口规范、数据交互标准、API接口，赋能高校内、外部数据共享和交互。

3.5 数据应用和开发技术

探索运用Spark、Flink、Sqoop等工具，结合数据可视化、Web开发及移动端开发技术，构建数据应用展示体系，以提升学校数据可视化水平并强化数据驱动决策能力。

3.6 数据安全和隐私保护技术

主要通过数据加密、权限控制、数据备份等技术保障数据安全与隐私保护。

4 创新与亮点

本次研究创新性地综合运用5G、云计算、物联网、移动互联、大数据等先进技术，以构建高校领域数据基座为理念，聚焦数据治理、数据开发、数据交换三大能力提升，致力于探索数据驱动教育管理变革与教学模式改革的路径，构建校园数字治理新范式，推动教育决策者从“经验决策”向“数据决策”转型。研究注重保护与利用现有资产，能为国内高校数字化转型建设提供可借鉴的示范模式。

5 应用成效

5.1 形成规范、可持续的数据治理支撑体系

通过实施数据治理，全面梳理并明确数据归属，消除多头管理隐患以确保“一数一源”，充分保障数据的有效性、一致性与安全性，使业务系统数据转化为数据资产，形成常态化教育教学质量监测与校园运营管理能力，持续为数据驾驶舱、多场景应用、跨区域协同及运营维护等提供高质量数据支撑。

5.2 形成准确、高效的数据共享交换体系

建设全校数据共享交换体系，对数据生产、流通各环节实施有效监控以保障信息畅通，实现跨部门业务协同与信息融合；同时建立完整的数据资源目录和数据集市，让数据多跑路，用户少跑腿。

5.3 建成可靠、融合的大数据分析体系

采用数据挖掘、数理统计和人工智能等相关技术，构建大数据分析框架，通过数据开发和数据分析实现对数据的组织和建模，提取数据中隐含的、未知的、具有潜在应用价值的信息和规律，为学校的科研、教务、学生和后勤等各项工作提供决策和指导，为学校校务治理、特色学科发展、教师发展、人才培养等提供准确的数据以及分析工具。

6 结束语

通过数据中台打造校园智慧大脑，构建学校发展新生态，重塑数字化新治理，对教育治理的体制机制、方式流程、手段工具进行全方位、系统性重塑。立足于学校发展、校务治理、人才培养等核心诉求，将分散、孤立的各类信息变成有用的数据资产，实现数据的快捷流通和共享。该研究成果经过扩展和功能增强后可升级为省、市、县等区域级教育智脑，具备广泛应用前景，能持续为国家教育数字化战略行动赋能助力。

参考文献

[1] 张忠华.数字中国战略与中国式教育数字化研究[J].中国教育信息化,2023,29(2):3-14.

[2] 钟卓.人工智能支持下的智慧学习模型构建及应用研究[D].长春:东北师范大学,2023.DOI:10.27011/d.cnki.gdbsu.2023.000004.

1009-0940-2025（2）-39-42

县域一体化数据治理体系的构建与实践

朱　剑　联通（江西）产业互联网有限公司　江西省南昌市　330096

摘　要：根据某县一体化数据基础平台迭代工程与数据工程试点工作方案，紧密结合既有建设成果，在全县范围推进政务数据全量全要素治理工程。通过整合数据能力与产品技术能力，向上无缝对接市级一体化数据基础平台，向下汇聚县直各部门政务数据资源，构建具备全域覆盖、可复用的数据管理能力，形成统一的数据服务体系。

关键词：县域一体化　大数据　政府治理　治理体系

0　引言

面对“十四五”发展新形势，各地正加速提升公共支撑能力，推进数字化改革与转型。当前，新理念、新需求、新产品与新场景不断涌现，数字技术的快速发展及其在全社会各领域的深度渗透，为构建县全域一体化数据基础平台奠定了坚实的技术基础与现实条件。该平台作为支撑县全域数字化发展的核心载体，既是推动业务流程重构、促进数据要素流通的关键抓手，也是畅通经济社会发展信息“主渠道”的新型基础设施，更是提升政府数字化水平、治理能力及治理现代化程度的重要举措。在数字中国建设的浪潮中，面对各地竞合发展态势，需抢抓机遇培育新质生产力，以高质量数字化转型驱动县全域发展。

1　当前数据治理现状

县政府各部门掌握着海量数据资源，但因统筹协调不足、统计口径多元、数据归属分散，导致部门间数据标准不统一、管理模式封闭、信息壁垒突出。随着智慧城市建设与数字政府改革的推进，全面精准掌握全县数据存量、推进信息资源整合共享的需求愈发迫切。当前县政府信息化数据共享仍存在以下问题。

1.1　数据治理分析待加强

县域现有政务平台体系庞大（包括经济、网格、公安等县级业务系统），但数据治理与分析机制尚未健全，导致大量数据价值未能得到高效释放。

1.2　数据库体系化待提高

基础数据库缺失，现有数据库数据的权威性不够，主要的基础数据库缺失。现有数据库能提供的资料较少，资料普遍局限于部门内使用，未做到横向互联。

1.3　数据互通共享待提升

由于存在“部门墙”，各部门以行政职能相互隔离，数据封闭性强，造成同质系统模块重复建设、数据重复统计、数据烟囱孤立，阻碍数据要素流通。已有数据资源无法实现上下级互联互通共享，市里的数据与县里共享程度不高。县域现有已建成的数据库规划性不强、规范性不高、标准性不够，全域层面上数据库结构不统一，造成治理难度大、成本高等问题。

2　需求分析

2.1　解决系统信息孤岛需求

建立县政府各部门共建共享、互联互通的数据交换支撑体系，以信息协同与系统联通为重点，突破体制性壁垒，实现跨部门、跨行业协同，消除信息孤岛，提升数据治理服务水平、数据场景利用水平、数据全域管理水平。

2.2　数据资源治理方面的需求

为全面贯彻落实国家大数据战略要求、政府数字化转型以及政务信息系统整合共享工作要求，构建县域数据要素智慧应用支撑体系，需要全面掌握政府数据资产现状，破除信息壁垒，支撑全域横向到边、纵向到底的业务协同应用，为全县数字经济发展奠定良好基础。

2.3 与省市一体化平台打通

县域多行业数据通过省市县三级业务系统直报省、市两级，县域层面未做留存，导致数据资源缺失。当前，县级单位申请调用省市级系统中县域数据的流程繁琐，难以快速响应本地数据需求。

通过构建县域一体化数据基础平台，确定细化业务应用场景，确认数据打通和碰撞需求，共同推动县本地数据、省市级数据的融合、分析和应用，为某县各应用提供数据资源、标准规范、公共数据能力基础支撑，保障某县各级业务需求。

3 总体设计思路

总体设计思路：以提升县政府服务效能、优化行政体制为核心目标，通过整合分散的政务信息资源，构建统一标准化的政务数据平台，实现全要素数据的高效共享与流通交换。

(1) 数据汇集分析：通过数据摸底完成全县全域数据应接尽接，实现海量数据汇集，完成对县数据源大汇聚、台账数据摸底、系统数据对接，省市级数据回流，其他渠道数据采集填报。

(2) 数据治理制定：通过对汇集完成的数据进行数据清洗、转换、加载、血缘等工序，完成后通过数据加工、数据管理、评估和稽查以及数据问题管理，实现数据质量的要求。

(3) 数据服务展现：通过数据清洗治理以及质量加工，形成元数据指标库，用于支撑上层数据决策服务，通过建设社会治理库、经济专题库以及人口库完成对城市管理以及经济的辅助决策。

3.1 总体架构图

数据治理通过数据汇聚完成对县全域数据采集并对数据加工清洗治理，建设元数据指标，实现对上层专题应用的支撑。通过区域一体化数据平台实现省市级数据的下沉，建设县数据资源服务，完成区域一体化平台的数据资源目录共享，并根据本地特色数据服务打造本地目录清单实现共享共用。总体架构如图1所示。

3.2 数据治理服务架构

(1) 数据源：接入现有人口库、法人库、社会治理事件库、经济专题库等现状数据资源，并整合其他系统及事件数据。

(2) 数据治理：通过平台工具对采集的数据进行清洗治理，完成对数据的资产目录的梳理。

(3) 数据应用：实现对专题数据的指标输入以及实现省市县三级共享共联，丰富区级资源目录服务。

数据治理服务架构如图2所示。

3.3 数据治理服务拓扑图

(1) 县级平台：建设县级数据资源目录，完成对部

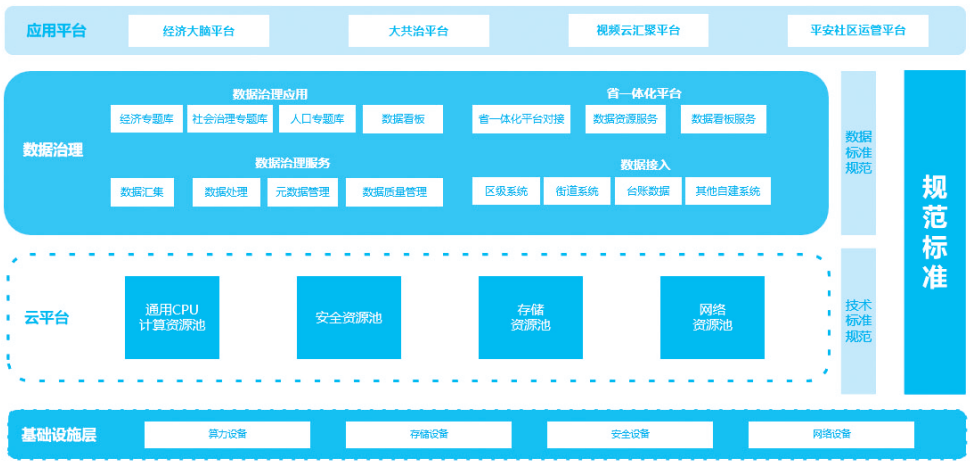

图1 总体架构

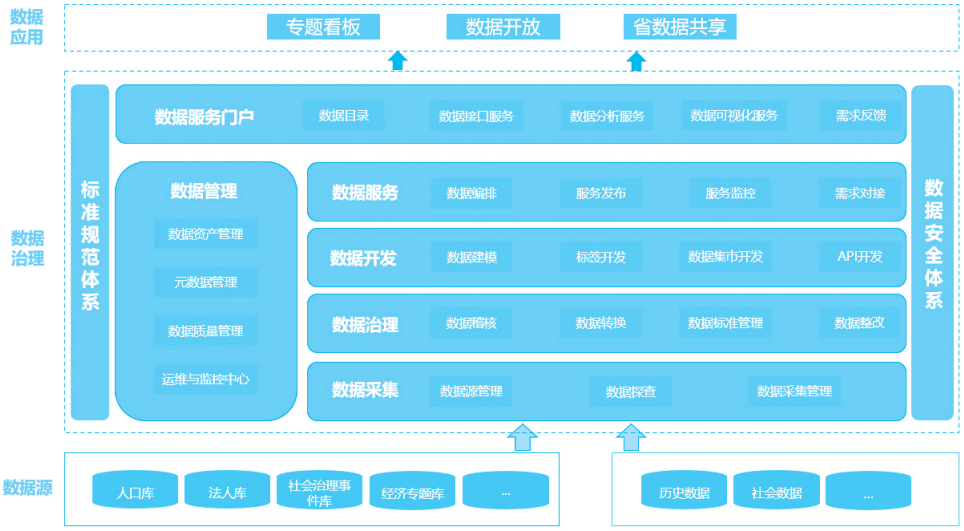

图2　数据治理服务架构

门、系统、专题数据的梳理并形成资源目录。

（2）市级平台：对接共享市级资源目录服务清单，并在市级资源目录下新增县域资源目录服务，完成资源的共享及本地化的资源订阅服务。

数据治理服务拓扑如图3所示。

4　数据治理服务技术方案

4.1　数据归集

（1）数据摸底。开展县域各街道、各委办局、企事业单位数据调研工作，梳理所有可对接的业务系统、前置库、电子材料、纸质材料，输出数据调研报告。

（2）数据实施。根据数据调研结果，完成数据实施方案编制，明确各类数据的接入方式、数据归集计划、建设范围。

（3）自建系统的数据归集。按照智慧应用业务数据需求对所归集的数据业务部门来源、数据类型进行初步分类，归集数据。

（4）单位数据归集。完成县域各委办局、企事业单位的数据归集，包含可对接的业务系统、前置库，电子材料以及纸质材料通过光学字符识别（OCR）服务电子化归集。

（5）基层直达数据对接。参考省级平台，新建市级与县级数据资源目录、数据资源信息、数据需求上报、审查及查询相关级联接口，发布接口规范到县级平台，实现市级平台汇聚的国家、省及市数据资源目录在某县平台同源发布、同步更新的功能。

（6）市级增量数据回流对接。与市级平台对接，完成增量数据的回流接入。

4.2　数据处理

（1）数据抽取。通过应用程序接口（API）、数据库直连、文件传输等多种抽取方式，依托分布式采集机制，综合数据量规模、实时性需求及具体业务场景等因素，实现数据变更的精准识别。

（2）数据清洗。建立数据清洗规则，运用引擎，实现空值处理、格式标准化、异常值识别、数据去重等功能：

◎ 空值处理：自动填充或标记缺失数据；

◎ 格式标准化：统一日期、数值等格式；

◎ 异常值检测：基于统计学方法识别异常数据；

◎ 重复数据消除：采用特征匹配算法去重。

（3）数据转换。开发可视化映射工具，支持以下转换操作：

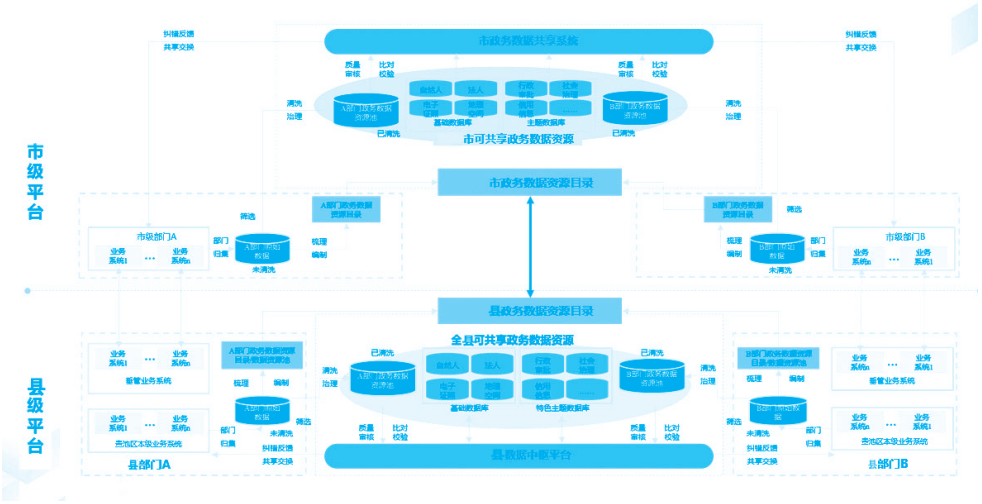

图 3 数据治理服务拓扑

◎ 数据合并：多表关联、字段拼接；

◎ 数据拆分：行列转换、字段分解；

◎ 数据计算：派生字段、聚合运算；

◎ 数据脱敏：敏感信息加密处理。

（4）数据加载。建立数据检测点，采取分批装填、增量装填、实时串流装填相结合的方式，确保装填资料完整一致，做到应加尽载。

4.3 数据质量监控

（1）建立监控指标体系：确定数据质量监控指标，如数据错误率、数据缺失率、数据更新及时率等，通过实时采集和分析这些指标，动态掌握数据质量状况。

（2）监控平台搭建：利用大数据技术搭建数据质量监控平台，对各业务系统的数据质量进行实时监测和预警。当数据质量指标超出设定阈值时，及时向相关部门和责任人发送预警信息，以便及时采取措施进行整改。

4.4 数据质量管理

（1）问题追溯与分析：对于数据录入、传输、处理等环节中出现的质量问题，可借助数据血缘关系对问题源头及处理流程进行追溯，并深入分析问题成因。

（2）整改措施制定与执行：深入分析问题根本原因，制定针对性的整改措施。对于人为操作失误导致的数据质量问题，加强人员培训和业务流程管理；对于系统故障或算法问题，及时进行系统修复和优化。

5 结束语

本方案通过技术创新与机制创新相结合，有效破解了县域数据治理的共性难题。未来将重点探索隐私计算技术在数据开放中的应用，构建“数据可用不可见”的新型共享模式。建议在数据治理实施中注重组织保障与人才培养，建立“技术+管理”双轮驱动的治理体系。

参考文献

[1] 刘叶婷,唐斯斯.大数据对政府治理的影响及挑战[J].电子政务,2014(6):20-29.

[2] 陆文涛,张红玉.政府治理过程中对大数据运用的探究[J].企业科技与发展,2019(11):65-67.

[3] 黄麟.大数据时代如何推动社会治理创新[J].人民论坛,2018(9):68-69.

1009-0940-2025（2）-43-46

药品追溯赋能零售药店监督检查新模式研究

何美斌　胡志华　王乐乐　江西电信信息产业有限公司　江西省南昌市　330000

摘　要：本文深入探讨药品追溯数据在药品零售经营监督检查新模式中的重要作用。通过构建模型对追溯系统采集的多源异构数据进行智能分析，探索追溯数据赋能药品零售经营监督检查新模式。通过构建集药品信息溯源、监督检查业务于一体的省级数据共享服务平台，形成药品零售经营监督检查工作“省级主建、市县主用，协同共治一盘棋”的格局，以数据助推智能化应用落地，实现药品零售经营监督检查在线化、实时化、简易化、高效化，充分发挥追溯数据价值，提升药品安全监管水平。

关键词：药品追溯　零售药店　监督检查　数据共享　数据价值

0　引言

药品安全是重大的民生和公共安全问题，零售药店作为药品销售的终端，直接面向消费者，其药品质量和经营行为的监管至关重要。传统的药品零售经营监督检查模式存在效率低、信息滞后等问题，难以满足日益增长的药品安全监管需求。药品追溯体系的建立，为药品零售经营监督检查带来了新的契机，通过对药品全生命周期信息的记录与追踪，建立药品零售环节预警模型，赋能全新的监督检查模式，对于保障公众用药安全、维护市场秩序具有重要意义。

药品零售经营监督检查作为药品质量安全监管体系的关键环节和重要措施，主要采取两种差异化检查模式：其一为常规日常检查，监管部门依据年度检查计划，对零售企业开展包括实地核查、文档审阅及人员访谈等标准化检查程序；其二是飞行检查，采用“双随机、一公开”机制实施突击性检查，通过非预期性监管手段强化企业日常合规意识。这两种检查模式都需要调阅零售企业的档案信息和药品经营、管理数据。

1　药品追溯数据研究的背景与意义

近年来，国家药品监督管理局（NMPA）持续推进药品监管体系改革，着力提升监管专业化与精细化水平。在药品零售经营监督检查领域，全面推行“一对一”精准监管模式，通过建立责任到人的监管机制，确保监督检查覆盖率达100%，有效强化药品零售环节的质量安全管控。同时，对药品追溯管理的重视度也越来越高，相关药品法律法规及政策都对药品追溯有明确的要求，2019年12月1日起施行的《中华人民共和国药品管理法》第三十六条规定，药品上市许可持有人应当建立并实施药品追溯制度，按照规定提供追溯信息，保证药品可追溯。第五十七条规定，药品经营企业购销药品，应当有真实、完整的购销记录。

随着医药行业的快速发展和监管政策的不断完善，以及国家法律法规及相关条例对零售药店的要求的不断提高，地方监管部门需要投入大量的人力物力来完成药品零售经营监督检查任务，以应对不断变化的市场环境和潜在风险。国家药品监督管理局公开发布的《药品监督管理统计年度数据（2023年）》显示，2023年全国药品零售企业日常监督检查138万余家次，出动检查人员400余万人次，其中发现违法违规的零售企业75369家次，完成整改企业69609家次，立案查处企业28794家次。药品网络交易服务第三方平台检查715家次，发现违规企业43家次，完成整改56家次，立案查处1家次。

目前药品追溯工作已实施落地多年，从药品上市许可持有人及生产企业到经营流通、零售、使用全过程的追溯数据汇聚体系基本形成，具备完善溯源管理的基础条件。但追溯数据结合监管需求的实际应用功能仍停留在常规信息查询和简单统计层面，未能为监管工作及业务流程提供实质性帮助，追溯数据的应有价值尚未充分发挥。本文旨在探索药品追溯数据赋能药品零售经营监督检查新模式，致力于将药品追溯与药品监管实际需求深度融合，通过构建预警及AI诊断模型，充分发挥数据价值，减轻监管压力，提升监管效能。

2 药品零售经营监督检查存在的问题

传统零售药店日常监督检查线性流程：制定计划→定期抽查→人工记录→纸质归档→公告通知，数据孤岛严重，存在诸多问题。首先监管人员需提前对所需数据及检查项内容进行打印。执行现场检查时，需手动填写检查结果。完成检查后还需要将检查记录录入监管系统。该流程存在效率低下和人为误差风险，既造成了时间和人力资源的浪费，又可能因人工记录失误导致检查结果的准确性下降，进而影响整体工作的规范执行。同时药品零售企业虽建立了质量管理制度，但在实际经营中并未有效执行，如药品购进验收记录存在不完整情况、储存养护措施存在不达标情况、处方药销售记录存在不规范情况等。一些零售药店的从业人员专业知识不足、责任心不强，容易存在侥幸心理易进行违规操作，对监督检查存在抵触情绪，出现问题时隐瞒不报，带来安全隐患。

药品追溯数据赋能药品零售经营监督检查新模式的研究目标，旨在通过药品各个流通环节“扫码打卡”留痕记录，将多元化追溯数据与监管需求相结合构建分析模型，通过自动AI诊断、匹配、预警及任务派发，让原本隐蔽的违规行为暴露出来，进而查处问题源头，同时深度挖掘和利用数据价值，开展跨区域跨部门协同监管，以此提升监管效率与精准度，保障药品安全。

3 药品追溯数据与零售监督检查融合的研究基础

在国家药品智慧监管体系建设的深入推进过程中，国家药品监督管理局与省级两级监管平台的协同发展取得了显著成效。通过构建四大核心数据库（企业审评审批信息库、药品标准库、进销存动态数据库和全程追溯数据库），实现了监管数据的结构化整合与动态更新。基于多源异构数据的标准化采集、智能清洗、深度关联和可视化分析，监管平台不仅提升了数据治理效能，更推动了“监管决策智能化、业务流程标准化、检查反馈实时化”的智慧监管新模式的建立。

（1）在基础设施方面，智慧监管一体化平台部署在省政务云平台上，具有可靠的安全保障。数据传输方面，建设有政务外网、政务内网高速的网络基础设施，在保障传递安全的基础上还实现药品数据的快速传输和共享。数据计算方面，基于药品智慧监管一体化平台及国家药品监督管理局数据查询系统，具备强大的数据存储和处理能力，能够高并发实时接收和处理来自药品生产企业、流通企业和零售企业的药品追溯数据。

（2）在数据标准方面，国家药品监督管理局梳理并发布了药品生产、流通和销售各个环节的数据标准，包括基础数据信息子集和应用数据信息子集两大类。基础数据信息子集包括药品上市许可持有人、生产企业、流通企业、使用单位等企业数据标准，以及国产药品、进口药品等药品的数据标准。应用数据信息子集包括药品生产企业的生产数据、流通企业的物流数据、零售企业的销售数据和使用单位的使用数据等标准。基于这些数据标准，可以减少数据集成过程的差异化，实现对药品全生命周期数据追溯的规范化管理。

（3）在数据对接体系建设方面，省药品智慧监管一体化平台构建了“纵向贯通、横向互联”的双向数据通道：纵向与国家药品监督管理局药品追溯协同平台、疫苗追溯协同平台、国家药品监督管理局数据共享平台三大核心系统深度对接，累计调用标准化API接口超200个，完成超5TB结构化数据的实时同步；横向整合生产企业、批发企业、零售药店及医疗机构等药品全生命周期各环节的扫码追溯数据流，形成覆盖“产—供—销—用”全链条的数据采集网络。

（4）在运营机制方面，省级药品监督管理部门构建了多维协同的管理体系。该体系具有以下特征：①权责

明晰化，通过制度设计明确监管部门、企业和技术服务商等主体的权责边界；②流程标准化，建立涵盖数据全生命周期的管理规范，包括采集校验、加密传输、分级存储和授权使用等环节；③安全保障体系化，整合数据分类保护、风险监测预警和突发事件应急响应三重机制；④模型迭代机制化，采用PDCA循环模式对分析算法进行持续性能评估与优化升级，确保系统运行效能呈螺旋式上升态势。

4 新模式技术路径

4.1 构建药品流通追溯数据资源库

(1) 数据采集与整合：通过建立完善的数据采集机制，全面收集汇聚药品的追溯数据。以国家药品监督管理局制定的12个药品追溯标准文件为基准，提供标准追溯接口，采集追溯过程信息，形成一个统一的药品追溯信息数据库。

(2) 数据分析与挖掘：运用大数据分析技术，对收集到的多元化药品追溯数据进行深入分析，结合监督检查业务，挖掘药品的基础信息、企业的基础信息、过程事件信息、过程管理信息、过程环境信息，融入监督检查的各个业务流程节点中，按照时间先后顺序组成药品追溯事件轴，对其中涉及的疑似回流、近效期/超期、特殊药品销售、重点药品销售、管制药品销售等数据构建预警模型，进行AI诊断。

4.2 打造智能化监督管理支撑应用

(1) 建设电子追溯模块：完善药品追溯查询，实现药品从生产、流通到销售的全链条追溯信息展示。

(2) 建设风险预警模块：建立药品零售经营监督检查风险预警模型，通过对数据的实时监测和分析，及时发现潜在的风险因素。

(3) 建设自动工单模块：开发AI诊断自动派单服务，自动基于预警分析结果生成任务工单，推送至相关市县检查人员。

(4) 建设移动监督检查模块：开发基于移动设备的移动检查应用APP，可以通过手机、PDA等移动设备随时随地进行现场药品零售企业的监督检查。

(5) 建设指挥决策中心：构建指挥决策中心，搭建可视化数据驾驶舱，集成多源数据分析功能，实现区域监管态势的一屏统览。

4.3 探索协同共治监督检查新模式

(1) 协同监管模式，加强与其他部门的协作，以数据为载体，通过授权进行数据共享，形成跨部门、跨行业协同监管合力。以标准的接口将本省的追溯数据开放出去，将外省的追溯数据接入进来，探索与省内外市场监督管理局、公安部门、医保卫健部门等单位开展联合监督执法新模式。

(2) 社会共治模式，鼓励企业门店及公众参与药品零售监督管理，建立举报奖励制度，开放脱敏数据，通过政府政务服务平台“药监小程序”扫一扫即可查看药品及零售企业信息，一键上报可疑数据，推动全民参与，社会共治。新模式技术路径如图1所示。

图1 新模式技术路径

5 新模式策略建议

5.1 制定数据资源标准，提供追溯体系建设依据

在国家有关标准框架下，制定药品追溯数据的对接范围、接口规范、采集指标和传输格式等标准规范，为药品上市许可持有人、生产企业、批发企业（含第三方物流、连锁总部）、零售企业和使用单位建设信息化药品追溯体系提供依据。

5.2 探索数据深度融合，扩展数据价值应用场景

数据融合是提高数据价值的重要手段。数据融合场景如图2所示。在药品数据追溯场景建设中，可以采用多源异构数据融合方法，一方面，借助技术手段支撑追溯数据的全面收集，通过引入先进的信息技术，如大数据、物联网、人工智能等，提高数据采集、处理和分析的效率和准确性。另一方面，人才培养机制是推动数据与业务深度融合的关键支撑。构建“政企学研”协同的人才培养机制，以促进监管数据与业务实践的深度融合。以省级药品监督管理局信息化部门为主导，建立跨领域人才培养协作平台；联合医药高等院校、行业协会及重点企业，开发“监管法规+数据技术”的模块化课程体系；重点培养具备药品政策法规解读能力、医药数据治理技术、业务需求转化能力的复合型人才梯队。

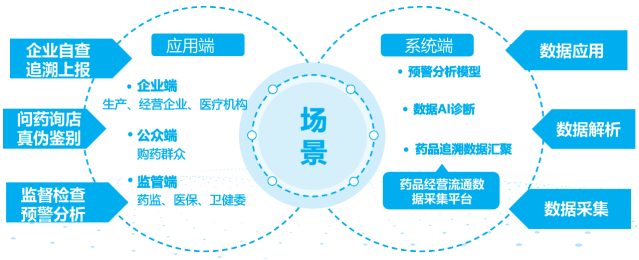

图2 数据融合场景

5.3 提升服务支撑能力，助力监管新模式落地

借鉴其他领域相关经验，如卫生健康、医疗保障及行业协会等，为药品数据追溯赋能药品零售经营监督检查的应用场景建设提供思路。联合市场监督管理局药品监管人员、乡镇药品安全协管员、村药品安全信息员等一线监管人员在监督检查过程中的需求为着手点、发力点，针对不同监管领域特点与痛点，梳理关键监管场景，确定模型应用方向，切合实际，落到实处，提升服务支撑能力让数据真正的服务于应用，让应用助力新模式落地。

5.4 形成高价值产品，推动产业高质量发展

通过建立数据资源体系、促进数据融合开发和提升服务支撑能力，形成一系列高价值的产品和服务，为药品监管部门提供全面、准确的药品数据查询及追溯服务，一方面帮助监管部门及时发现和处理药品安全问题，维护市场秩序，另一方面强化落实企业主体责任，推动产业高质量发展。

6 结束语

药品追溯是提升零售监督检查效率的有效手段，药品追溯系统重构了零售药店监管的底层逻辑，通过技术赋能、模式创新与生态协同，实现从“事后查处”到“事前预防”的转变。以政策强制力推动数据全量采集，以技术创新降低应用成本，以跨部门协同打破信息孤岛，最终形成“政府监管、企业自律、社会监督”的共治格局，为药品安全治理现代化注入强劲动力。

参考文献

[1] 国家药品监督管理局综合和规划财务司,国家药品监督管理局信息中心.药品监督管理统计年度数据(2023年)[R/OL].(2024-05-21)[2025-04-15].https://www.nmpaic.org.cn/zhzx/202405/t20240521_424450.html.

[2] 国家药品监督管理局.药品追溯码标识规范:NMPAB/T 1011—2022[S].北京:中国质检出版社,2022.

[3] 宋家鸿,黄晓燕.关于利用药品追溯码优化药品抽检监管的设想[J].中国检验检测,2024(3):75-77.

[4] 丁铁钢.关于采用商品条形码、电子监管码扫描优化药品抽样流程的设想[J].中国合理用药探索,2015,12(7):42-44.

[5] 胡泽利.我国药品信息追溯体系建设存在的问题及对策研究[J].中国药房,2019,30(22):3025-3029.

[6] 潘娇,徐金凤,朱磊玲,等.国外药品追溯体系监管制度以及对我国的启示[J].科技创新导报,2017(7):170-171.

[7] 刘隽隽,牛童,王慧青.医改背景下医药零售企业商业模式升级研究[J].现代商业,2020(24):29-30.

1009-0940-2025（2）-47-51

基于AIRS辅助的认知无人机安全通信策略研究

何嘉宏　王　振　李志悦　温家进　余礼苏　南昌大学　江西省南昌市　330009

摘　要：随着智能反射面（Inteligent Refecting Surface，IRS）技术的成熟，其在认知无人机安全通信领域的应用成为认知无线低空通信的研究热点。本文聚焦主动智能反射面（Active Inteligent Refecting Surface，AIRS）辅助的认知无人机安全通信网络，该认知网络包含主次网络，其中次网络由搭载AIRS的无人机、多个次级用户（Secondary User，SU）、次传感器（Secondary Internet of Things，SIoT）和窃听者（Secondary Eavesdropper，SE）构成。为提升系统安全性能，地面还部署了干扰机（Jammer）和被动智能反射面（Passive Inteligent Refect - ing Surface，PIRS）。在不影响主网络通信的前提下，通过联合优化AIRS相移矩阵、PIRS相移矩阵、SIoT发射功率及无人机飞行轨迹，实现了次网络总平均保密速率的最大化。仿真结果显示，相较于基于PIRS的优化方案及其他对比方案，本文提出的基于AIRS的优化方案能显著提升认知无人机网络系统的安全保密速率。

关键词：无人机　主动智能反射面　干扰机　安全通信

0　引言

随着5G在全国范围内成功商用，基础通信设施已能满足日常通信负荷。但在突发情况或非常规临时场景中，仅靠地面无线通信设施往往难以应对，例如重大自然灾害后的网络重建、偏远地区的临时通信部署以及重大节假日聚集活动现场的无线资源分配等。与地面固定基站（BS）相比，无人机具有机动性强、部署便捷、操作简单且覆盖范围广等优势，其与地面用户间的传输链路多以视距链路为主。因此，无人机特别适合作为空中基站或者中继辅助为受灾区域或发生紧急情况时提供临时的通信服务。无人机可作为空中基站辅助通信以提高系统吞吐量、提高能量使用效率和辅助认知无线电网络提高频谱利用率等。由此可见，无人机辅助通信已成为移动网络中不可或缺的潜在技术。

由于无线通信的广播特性，用户信息在空中传输时面临安全隐患，而无人机通常飞行高度较高，与无人机通信的链路多为视距链路。因此，无人机作为中继辅助无线通信时更容易遭到窃听从而泄露信息。智能反射面（IRS）能够为无线通信系统构建智能化、可重构的无线传播环境，被视作解决上述问题的极具潜力的候选技术之一。

早期IRS技术发展尚未成熟时，无人机通常仅搭载被动智能反射面（PIRS）。尽管PIRS能帮助无人机克服非视距链路的阻碍，以实现更优的辅助通信效果，但IRS本身存在“乘法衰落”效应——源端到接收端的等效路径损耗为源端到IRS、再从IRS到接收端的路径损耗的乘积，这一损耗通常远大于直接路径损耗。因此，在视距链路占比较高的场景中，PIRS难以充分发挥作用。为提升IRS的实用性，主动智能反射面（AIRS）应运而生。AIRS在PIRS的基础上，通过接入电源消耗一定功率，可对反射信号进行放大处理。

本文利用AIRS和PIRS的优势，研究无人机通信中物理层安全的提升问题，选取平均保密速率作为物理层安全性能的衡量指标。考虑到无人机作为移动中继与用户间的通信链路多为视距（LOS）链路，容易遭到窃听，故通过发挥无人机灵活移动的优势，结合对AIRS及PIRS的相位调整，实现双重优化：一方面最大化无人机作为移动中继时次级用户的通信速率，另一方面最大化

友好干扰基站对窃听者的干扰强度，从而极大提升该无线通信场景下的总平均保密速率。

1 通信系统模型

如图1所示，本文使用AIRS-UAV辅助认知无线电网络（CRN），研究了CRN中的物理层安全问题。在此网络中，由于密集高楼的存在地面信道受到了严重堵塞，次传感器（SIoT）和次级用户（SU）之间无法进行直接通信。于是采用了一架搭载了AIRS的无人机协助次网络通信，AIRS的电源由无人机提供，同时无人机可以控制AIRS每个反射单元的相位与放大系数。SIoT发射的信号通过AIRS反射到SU，同时采取时分多址的方式分配多个SU通信信道，在同一时刻SIoT发射的信号仅会传输至一个SU。由于窃听者（SE）的存在，信息容易遭到窃听。于是借助了一个干扰机（Jammer）发送干扰信号来干扰窃听者，为进一步提升所有次级用户的安全性，在特定建筑物处部署一个PIRS来协助干扰机。由于认知网络中主次网络共享频谱，在提升次网络安全性的同时，还要保障主网络的通信不受到过多影响。假设Jammer与AIRS之间几乎不存在通信链路，同时忽略IRS之间多次反射信号。

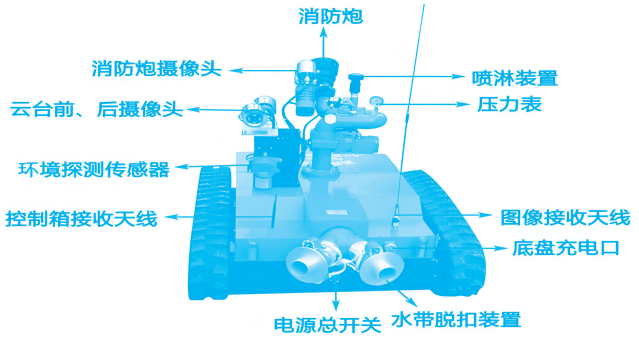

图1 AIRS-UAV辅助的认知无线电网络模型

SIoT、SE、第k个SU、PU、Jammer和PIRS的位置分别表示为：(w_{sIoT}，0)，(w_{SE}，0)，(w_k，0)，(w_{PU}，0)，(w_J，0)和(w_I，h)。其中w_{sIoT}，w_{SE}，w_k，w_{PU}，w_J，w_I分别表示SIoT、SE、第k个SU、PU、Jammer和PIRS的水平位置，h表示PIRS的中心点的高度。假设有k个SU，第k个SU的水平位置可以表示为$w_k=(x_k,y_k)$。假设无人机的飞行任务时间为T，最大飞行速度V_{max}，飞行高度为H，从起始点q_{ini}飞往终点q_{fin}。将无人机执行的飞行任务总时间T离散成N个时隙，时隙长度为δ_t，即$T=N\delta_t$。其中δ_t足够小以至于无人机在每个时隙内的飞行状态不变。因此，在第n（$n\in\{1,2,\cdots,N\}$）个时隙中，无人机的位置可以表示为（q [n]，H），其中q [n] 之间需要满足以下约束：

$$\| q[n+1]-q[n]\| \leq V_{\max}\delta_t, n=1,\cdots,N-1 \quad (1)$$

$$q[1]=q_{ini}, q[N]=q_{fin} \quad (2)$$

在这个CRN中，SIoT发送的信号通过AIRS反射至SU，Jammer发送的干扰信号通过PIRS反射至窃听者。SIoT和Jammer在第n个时隙的发射功率可以分别表示为P_{SIoT}和P_J。发射功率有最大功率和平均功率限制，可以表示为：

$$\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}P_{SIoT}[n]\leq P_{avg} \quad (3)$$

$$0\leq P_{SIoT}[n]\leq P_{\max},\forall n \quad (4)$$

由于采用时分多址技术服务次网络中的k个SU，在此引入调度函数$a_k[n]$。当$a_k[n]=1$时，代表此时无人机仅与第k个用户进行通信。当$a_k[n]=0$时，代表此时用户不接收信号。而在同一时间SIoT仅与一个SU进行通信，调度函数的约束可以表示如下：

$$\sum_{k=1}^{K}a_k[n]\leq 1,\forall n \quad (5)$$

$$a_k[n]\in\{0,1\},\forall k,\forall n \quad (6)$$

设AIRS和PIRS分别由M和L个反射单元组成，AIRS和PIRS的相位用Θ_{AIRS}和Θ_{PIRS}分别表示，Θ_{AIRS}与角幅值$\theta_m[n]$有关，Θ_{PIRS}与ω_l有关。由于AIRS并不能无限放大反射的信号，AIRS的功率有最大值，其最大功率约束可以表示如下：

$$|P_{SIoT}[n]\Theta_{AIRS}[n]g_{sIoT}[n]|^2+\Theta^2_{AIRS}[n]\sigma_R^2\leq P_{\max}^{AIRS},\ \forall n \quad (7)$$

设第n个时隙无人机与SIoT之间的信道增益为$g_{sIoT}[n]$，第n个时隙无人机与第k个SU的信道增益为$g_k[n]$，第n个时隙无人机与SE的信道增益为$g_{SE}[n]$，第n个时隙PIRS与Jammer的信道增益为G_J。

由于AIRS处存在一定的噪声功率σ^2_{AIRS}，通过AIRS放大并反射来自SIoT的信号时，同时会将AIRS处的噪声功率放大，因此，放大后的σ^2_{AIRS}不可以忽略。SE处的

接收信号还会受到来自Jammer的干扰信号。第k个SU的接收信号$S_k[n]$可以表示为：

$$S_k[n]=\sqrt{P_{SIoT}[n]}\,g_k^H[n]\Theta_{AIRS}[n]\,g_{SIoT}[n]+ g_k^H[n]\Theta[n]\sigma^2{}_{AIRS}+\sigma_k^2 \tag{8}$$

上式中σ_k^2和σ_{SE}^2代表第k个SU和SE处的总噪声功率，包含了来自主用户的干扰和各自接收处的噪声。因此，在第n个时隙，第k个用户的可达速率为：

$R_k[n]=a_k[n]$.

$$\log_2\left(1+\frac{P_{SIoT}[n]|g_k^H[n]\Theta_{AIRS}[n]\,g_{SIoT}[n]|^2}{g_k^H[n]\Theta^2{}_{AIRS}[n]\,\sigma^2_{AIRS}+\sigma_k^2}\right) \tag{9}$$

因此，k个SU在第n个时隙的保密速率和可以表示为：

$$R_{\text{sec}}[n]=\sum_{k=1}^{K}R_k[n]-R_{SE}[n] \tag{10}$$

其中，$R_{SE}[n]$为窃听速率。

2 优化问题

本文的目标是通过联合优化AIRS的相移$\Phi=\{\Theta_{AIRS}[n],n=1,2,\cdots,N\}$、PIRS的相移$\Theta$、SIoT的传输功率$P=\{P_{SIoT}[n],n=1,2,\cdots,N\}$、用户调度函数$A=\{a_k[n]n=1,2,\cdots,N,k=1,2,\cdots,K\}$及无人机的飞行轨迹$Q=\{q[n]n=1,2,\cdots,N\}$，实现次网络平均保密速率的最大化。该问题可以表示如下：

$$\text{P2:}\max_{A,Q,P,\Phi,\Theta}\frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N}R_{ses}[n] \tag{11}$$

$$s.t.P_{SIoT}|g_{PU}^H[n]\Theta_{AIRS}[n]\,g_{SIoT}[n]|^2\le\Gamma,\forall n, \tag{12}$$

$$0\le\theta_m[n]\le2\pi,\forall m,\forall n \tag{13}$$

$$0\le\omega_l\le2\pi,\forall l, \tag{14}$$

(1) ~ (7)

其中，式（11）表示系统的平均总保密速率。约束（12）表示次网络对主网络造成的干扰约束。约束（13）和约束（14）分别表示AIRS和PIRS的相位约束。其中问题（11）非凹，以及约束（6），（8）非凸，因此该问题是一个非凸问题。

由于约束的非凸性和离散性，问题P2是一个非凸问题。为了求解该问题，本文使用了交替优化将问题分为四个子问题进行逐步处理，分别进行的是AIRS的相移优化、PIRS的相移优化和用户调度优化、SIoT的发射功率优化和无人机的飞行轨迹优化。经过多次迭代优化，直到目标函数值趋于收敛后，跳出优化循环，最后得到问题P2的近似最优解。

3 算法设计

本文通过问题分析和优化处理，提出了一种基于交替优化的联合优化算法来处理非凸问题，该联合优化算法由表1给出：

表1 求解问题P2的联合优化算法

Algorithm1：求解问题P2的联合优化算法
1：初始化： $P^{(0)}$，$\Phi^{(0)}$，$Q^{(0)}$，迭代次数$r=1$。设置阈值ε。 2：重复 3：基于给定的$P^{(r-1)}$，$\Phi^{(r-1)}$，$Q^{(r-1)}$，通过求解PIRS相移和用户调度优化子问题得到$\Theta^{(r)}$和$A^{(r)}$； 4：基于给定的$\Theta^{(r)}$，$A^{(r)}$，$\Phi^{(r-1)}$和$Q^{(r-1)}$，通过求解SIoT发射功率优化子问题得到$P^{(r)}$； 5：基于给定的$\Theta^{(r)}$，$A^{(r)}$，$P^{(r)}$和$\Phi^{(r-1)}$，通过求解AIRS相移优化子问题得到$\Theta^{(r)}$； 6：基于给定的$\Theta^{(r)}$，$A^{(r)}$，$P^{(r)}$和$\Phi^{(r)}$求解无人机飞行轨迹优化子问题得到$Q^{(r)}$； 7：$r=r+1$； 8：直到满足：目标函数值变化量小于ε。

从算法1开始，求解问题P2的复杂度由四个子问题主导。用户关联及被动IRS的相移设计复杂度由仅由用户关联决定，而用户关联问题的复杂度为变量总数KN，因此该子问题是一个标准的线性规划问题。功率控制子问题和轨迹优化子问题采用SCA方法求解，其复杂度取决于其变量和约束条件。因此，算法1求解问题P2的总复杂度为：

$$O\Big(S\big(KN+(2K+6)^{3.5}\log_2\frac{1}{\varepsilon_1}+ (3N)^{3.5}\log_2\frac{1}{\varepsilon_2}+(K+4)^{3.5}\log_2\frac{1}{\varepsilon_3}\big)\Big) \tag{15}$$

其中，S为算法的总迭代次数，ε_1，ε_2，ε_3分别为求解不同子问题的精度。

4 仿真结果分析

图2表示当无人机的飞行任务时间T=60s时，不同干扰阈值下，无人机的飞行轨迹图。其中黑色线段是无人机的初始轨迹。无人机初始飞行轨迹从起始点出发，以匀速直线运动的方式飞往终点位置。从图中可以看

出，当干扰阈值「=-56dBm时，无人机从起始点出发朝着SIoT的方向快速飞行。由于途中会经过主用户区域，为了防止次级网络的通信不过多地影响主网络，无人机会以远离主用户的趋势飞往SIoT上空附近。当无人机经过SIoT附近后，无人机再朝着最近的SU1飞行。随后经过SU2和SU3的上空，最后抵达终点。进一步分析发现，随着干扰阈值变小，无人机飞往SIoT上空所需的飞行弧度变大，同时花费的时间和距离也随之变大。这是因为无人机对主用户的干扰程度与SIoT和PU的距离的乘积的平方呈负相关关系。当干扰阈值变小时，无人机需增大与SIoT、PU的距离，才能保障主用户的通信质量。

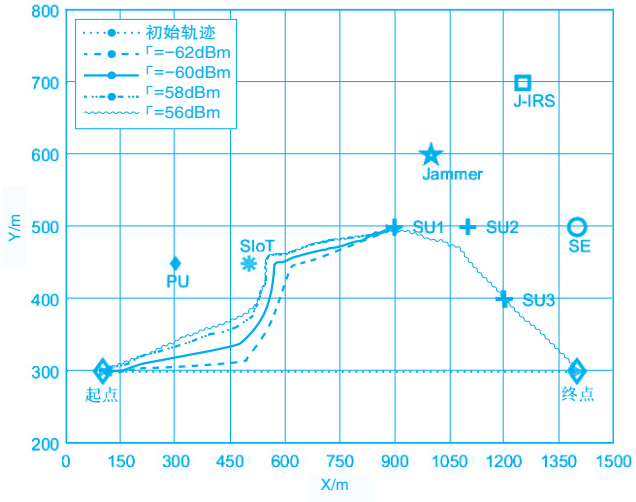

图2 不同干扰阈值下无人机的飞行轨迹

图3呈现了本文提出的优化方案与其他三种方案在次级网络系统最佳平均保密速率随AIRS元件个数变化的对比情况。其中，Tra&Pow&AIRS方案代表本文提出的基于AIRS的优化方案；No Tra&Pow&AIRS方案为不充分利用无人机的机动性，让无人机执行飞行任务时，仅从起点飞往终点的方案。Tra&No Pow&AIRS方案为不规划SIoT的发射功率，让SIoT的发射功率始终处于一个固定值的方案。Tra&Pow&PIRS方案表示让无人机携带PIRS完成飞行任务，联合优化无人机的飞行轨迹、SIoT的发射功率、用户调度、无人机携带的PIRS和地面PIRS相移的方案。

从图3可以看出，本文的方案效果最好，而No Tra&Pow&AIRS方案的效果最差，这是因为不能利用无人机的机动性获取更好的通信链路是灾难性的。Tra&Pow&PIRS方案中的无人机由于携带是PIRS，不能对反射在PIRS的信号进行放大反射，因此能获得的最佳平均保密速率性能较差。Tra&No Pow&AIRS方案由于没有对SIoT发射功率优化，并不能在较佳的信息传输位置保持一个较高的发射功率，因此收敛后的平均保密速率不如本方案。本文提出的优化方案与其他方案相比至少提升了25%～300%。

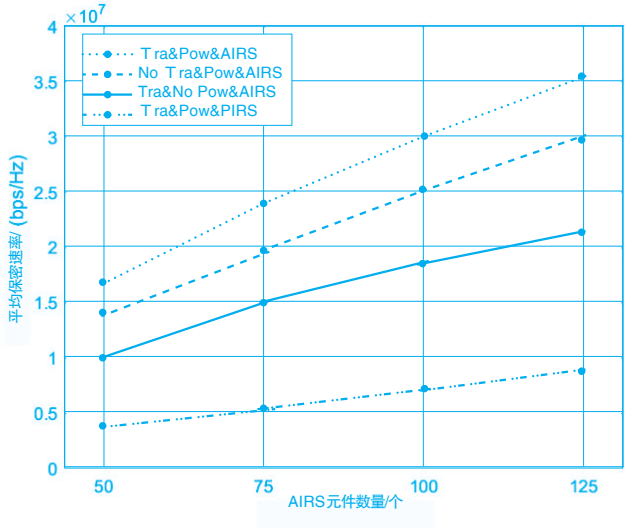

图3 不同方案下平均保密速率随AIRS元件个数变化的关系

5 结束语

本文通过联合优化AIRS相移矩阵、PIRS相移矩阵、SIoT发射功率及无人机飞行轨迹，实现了次网络总平均保密速率的最大化，并通过与不使用AIRS、缺少轨迹或发射功率优化的方案对比，验证了所提方案的最优性。研究表明，随着AIRS元件数量增加，无人机搭载AIRS的性能优势逐渐凸显，但元件数量的增长会导致成本上升，且从曲线趋势来看，各方案的平均保密速率增量趋于收敛，说明并非元件越多越好。综上，本文提出的基于AIRS的优化方案在性能上明显优于基于PIRS的方案及其他对比方案。

参考文献

[1] Qi S,Lin B,Dai Y,et al. Hypergraph-based mod-

eling and throughput optimization for UAV-assisted offshore communication networks[C]//2023 IEEE 23rd International Conference on Communication Technology(ICCT). Piscataway:IEEE,2023:1153-1158.

[2] Chen X,Chang Z,Zhao N,et al.IRS-based secure UAV-assisted transmission with location and-phase shifting optimization[C]//2023 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops).Piscataway:IEEE,2023:1672-1677.

[3] Wang D, Zhao Y, Lou Y, et al. Secure NOMA based RIS-UAV networks: Passive beamforming and location optimization[C]//GLOBECOM 2022-2022 IEEE Global Communications Conference. Piscataway:IEEE, 2022:3168-3173.

[4] Zhang H, Huang M, Zhou H, et al. Capacity maximization in RIS-UAV networks: A DDQN-based trajectory and phase shift optimization approach[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications,2022, 21(4):2583-2591.

[5] Singh S K,Agrawal K,Singh K,et al.A NOMA enabled hybrid RIS-UAV-aided full-duplex communication system[C]//2022 Joint European Conference on Networks and Communications & 6G Sum-mit (EuCNC / 6G Summit). Piscataway: IEEE, 2022:529-534.

[6] Ngo Q T,Phan K T,Mahmood A,et al.DRL-based secure beamforming for hybrid-RIS aided satellite downlink communications[C]//2022 IEEE International Conference on Communication, Networks and Satellite (COMNETSAT). Piscataway: IEEE, 2022: 432-437.

[7] Lu Y,Luo Z,Gao Z,et al.Throughput maximization in multi-UAV NOMA networks based on deep reinforcement learning[C]//2023 2nd International Conference on Computing, Communication, Perception and Quantum Technology (CCPQT).Piscataway: IEEE,2023:78-83.

[8] Lyu F,Cheng N,Zhu H,et al.Intelligent context-aware communication paradigm design for IoVs based on data analytics[J].IEEE Network,2018,32(6): 74-82.

[9] Guan Y,Wang Y,Bian Q,et al.High-efficiency self-driven circuit with parallel branch for high frequency converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2017,33(2):926-931.

[10] Sun F,Wang P,Zhao J,et al.Mobile data traffic prediction by exploiting time-evolving user mobility patterns[J].IEEE Transactions on Mobile Computing,2021,20(12):4456-4470.

[11] 陈新颖,盛敏,李博,等.面向6G的无人机通信综述[J].电子与信息学报,2022,44(3):781-789.

（上接第34页）

参考文献

[1] 张李荪. 基于WebGIS的山洪灾害预警信息系统设计[J]. 人民长江, 2009(9): 84-85.

[2] 张李荪,徐俊. 峡江水库移民信息系统设计与实现[J]. 人民长江, 2011(21): 92-95.

[3] 焦利民,董华林,郑顺祥. 官路水库数字孪生建设关键技术研究[J]. 水利技术监督, 2025(3): 52-56.

[4] 张李荪,刘杨,张国文,等. 一种基于BIM和GIS的洪水淹没范围动态展示技术[J]. 江西通信科技, 2022(1):25-27.

中国联通 China unicom | 联通智家

联通云手机

联通云智手机

您的私人订“智”手机

文件上传
内存容量自由升级

联通畅游
千元机也能畅玩3A

海量福利
视频权益一网打尽

AI助手
一点使用主流大模型

数据守护
持续升级的安全保障

码上体验

投稿联系方式

地　　址：江西省南昌市红谷滩区红角洲赣江南大道2698号《江西通信科技》编辑部

邮　　编：330038

联系电话：0791-83721872

电子信箱：jxtxkj@jxtxxh.cn

（更多信息请关注公众号）