第48卷 第6期 2024年3月25日
DOI：10.7500/AEPS20231113005
电力系统自动化
Automation of Electric Power Systems
Vol. 48 No. 6 Mar. 25，2024

卫星互联网赋能新型电力系统创新应用

周 全[1]，周 柯[2]，金庆忍[2]，帅智康[1]
（1. 湖南大学电气与信息工程学院，湖南省长沙市 410082；
2. 广西电网有限责任公司电力科学研究院，广西壮族自治区南宁市 530023）

摘要：卫星互联网是通过卫星规模化组网，以航天、通信、网络、数据等技术为支撑的全球全域全时新型网络信息基础设施。与传统卫星网络相比，具有广覆盖、低时延、高带宽、低成本等优势。通过剖析新型电力系统在广域覆盖、抗毁顽存、垂直应用等信息化能力建设方面的挑战，凝练高中低轨协同的卫星互联网内涵定义与能力特征，提出卫星互联网在电力规划、态势感知、巡视检修、防灾应急等业务领域赋能新型电力系统的实践路径。提出基于零信任的星地融合网络信息安全体系，为建设、运行及发展空天地全面一体、通导遥深度融合的新型电力系统提供基础参考，进一步提升新质生产力水平。

关键词：卫星互联网；新型电力系统；空天地一体；通导遥融合；新质生产力

0 引言

建设数字中国是推进中国现代化和实现经济社会优质、高效发展的有力支撑和强大引擎[1]。作为能源绿色低碳转型的关键抓手，新型电力系统的信息化能力升级是数字中国建设的重要一环，将直接对电力系统的安全稳定、新能源消纳的高效可靠[2-3]以及电力服务的经济优质产生影响[4-5]。城区、乡镇等人口密集区域的地面网络通信服务性能可以基本满足电力系统日常业务需要[6-7]，但是仅依赖现有网络设施和通信模式，新型电力系统全面可观、精确可测、高度可控的信息化能力建设面临覆盖不全、性能不均、韧性不足、结合不深的体系性短板。

1）地面通信网络覆盖盲点多，建设、运维成本高。山区、边区、高原、岛礁等偏远地区的地面通信网络受地形、气候等因素影响，存在建设成本高、组网周期长、运行维护难、拓展升级难等问题，导致大量信息覆盖存在盲点[8-9]，且自然灾害、人因事故等会造成信息盲点扩散，难以保障新型电力系统的广域信息联通。

2）地面网络服务性能不均，难以支撑海量单元接入。新型电力系统中多类型新能源场站成为发电主体，大量聚集在沙漠、戈壁、荒漠、海洋等区域，而地面通信网络主要覆盖城镇等人口密集区[10]，两者的业务覆盖面并不完全重合，并且发、输、变、配、用电侧的通信网络服务性能不均衡，难以满足新型电力系统海量源网荷储单元并发接入的高带宽与实时数据双向传输的低时延要求。

3）地面通信网络韧性不足，难以支撑应急场景通信需求。地面通信网络的服务质量易受地震、洪涝、泥石流等自然灾害的影响，应急突发事件造成的通信系统单点失效可能引发电力系统片区数据损毁或丢失[11]，进而阻碍运行调度、故障排查、恢复等电力业务的开展，亟需高可靠、易部署的卫星宽/窄带通信备份来保障新型电力系统网络韧性。

4）卫星服务性能受限，垂直业务应用宽度深度不足。目前，电力系统主要采用中高轨卫星服务，而中高轨卫星传输时延、覆盖重数、灵活部署等方面性能相对不足，如卫星信号易受地形影响（南山效应）[12]、北斗短报文通信服务吞吐量较小、卫星遥感数据信息时效性不强等，并且地球同步轨道轨位资源日渐枯竭，导致卫星服务能力相对有限，难以满足新型电力系统业务应用的需求。

商业航天的迅猛发展推动卫星单位通信成本降低了数个量级，加速了卫星互联网建设发展及其应用推广。卫星互联网作为地面通信网络的拓展及补充，所具备的广覆盖、低时延、高带宽、低成本的特征优势和全天候、全天时的通信、导航、遥感综合信息服务能力将使其成为新型电力系统建设发展的重要新质赋能力量，为规划运行、态势感知、巡视检修、防

收稿日期：2023-11-13；修回日期：2024-01-12。
上网日期：2024-02-21。
国家重点研发计划资助项目（2023YFC3321703）；国家杰出青年科学基金资助项目（52125705）。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

灾应急等电力业务提供全方位、多维度的信息化支撑和保障。

新型电力系统与卫星互联网分别是中国能源和通信领域的战略基础设施，是支撑数字中国建设的关键基石。推动卫星互联网赋能新型电力系统创新应用[13]，将赋予新型电力系统更多新特征和新场景。构建广域多维信息流引领优化能量流和业务流，贯通源网荷储各环节以支撑实现全面可观、精确可测、高度可控数字电网建设，使新型电力系统更加绿色高效、柔性开放、安全可靠，对中国能源低碳化、数字化转型将产生深远影响[14-16]。本文系统论述卫星互联网赋能新型电力系统的典型应用场景、关键技术、安全模式等，以及构建空天地全面一体、通导遥深度融合的新型电力系统实践路径和发展形态，旨在推动新型电力系统和卫星互联网深度融合发展。

1　卫星互联网内涵定义、发展历程及能力特征

卫星互联网通过规模化高中低轨卫星组网、多元异构卫星星座协同，可以提供全域、全时的通信、导航、遥感等大时空尺度综合信息服务，是极具发展潜力和创新动能的新质赋能综合应用系统[17-19]。

1.1　卫星互联网内涵定义

卫星互联网是以卫星构成的天基信息网络为主体，以地面设施构成的地基信息网络为基础，以航天、通信、网络、数据等技术为支撑的立体化综合信息网络。卫星互联网由不同轨道、不同类型、不同性能的星座组成，通过星间链路连接位于海、陆、空及近地空间的各种地面站和用户终端，利用星上处理、交互、路由等技术，实现业务信息的获取、储存、传输、处理、融合、分发等，为多元业务场景提供全覆盖、全天时、全天候的通信、导航、遥感等大时空尺度综合信息服务。

卫星互联网将当前仅覆盖全球人口密集区域的地面宽带通信网络拓展到覆盖空天地海全域，并通过巨型星座承载通信、导航、感知等有效载荷，结合地面大数据、云边计算等新型支撑设施，面向各行业提供更加泛在、弹性、智能的网络服务和综合信息保障服务[20]。如图1所示，作为天基复杂巨系统，卫星互联网具有多种复合功能，凭借其广覆盖、高带宽、低时延的通信能力特征优势，为串联多类型卫星所提供的传输、定位、感知等功能提供核心保障[21]。卫星互联网横向协同各行业生产需求，提供优质可靠高效的赋能服务；纵向贯通产业链上下游业务，通过数据挖掘和传感算一体实现产业链的提质增效。



(a) 新型电力系统潜在赋能应用领域　　(b) 卫星互联网能力特征

图1　卫星互联网能力特征与新型电力系统潜在赋能应用领域

Fig. 1　Capability characteristics of satellite Internet and potential enabling application areas for new power system

典型轨道卫星星座如图2所示。图中：极轨道卫星的轨道平面穿过地球极点，其组网星座可以实现南北极地区域的全球覆盖；倾斜轨道卫星的轨道平面与赤道成一定倾斜角度，其组网星座可以对中低纬度重点区域实现多重覆盖和性能增强。

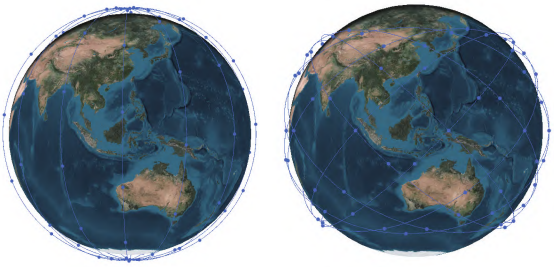
1.2　卫星互联网发展历程

卫星互联网在广义上属于第6代无线通信技术(6G)范畴[22-23]，旨在推进空天地海一体化通信体系。如图3所示，卫星互联网发展历程大致可以划分为起步试点、加速发展、全面商用3个阶段[24]。

第1阶段：起步试点阶段。卫星互联网的概念在20世纪90年代被提出[25]，当时低轨卫星互联网星座系统规模小、速率低，而高轨系统容量小、时延高，难以与同步兴起的低成本地面移动通信竞争。

第2阶段：加速发展阶段。2010年前后，受军民商卫星通信用户规模扩大的影响，高通量、大容量卫星系统单星服务容量实现几十到上百倍的增长[26]，服务种类逐渐多样化、多元化。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net



极轨道卫星星座，轨道高度为1 000 km，倾角为0°，轨道面数为10，共100颗卫星

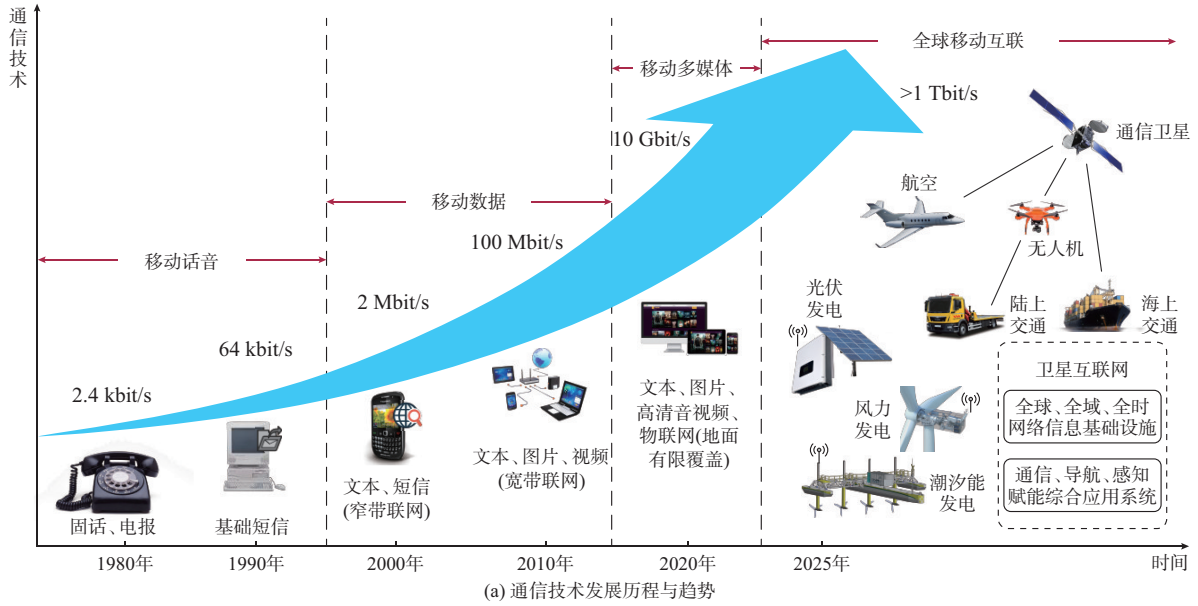
倾斜轨道卫星星座，轨道高度为1 000 km，倾角为50°，轨道面数为10，共100颗卫星

图2　极轨道卫星星座与倾斜轨道卫星星座
Fig. 2　Satellite constellations of polar orbit and inclined orbit

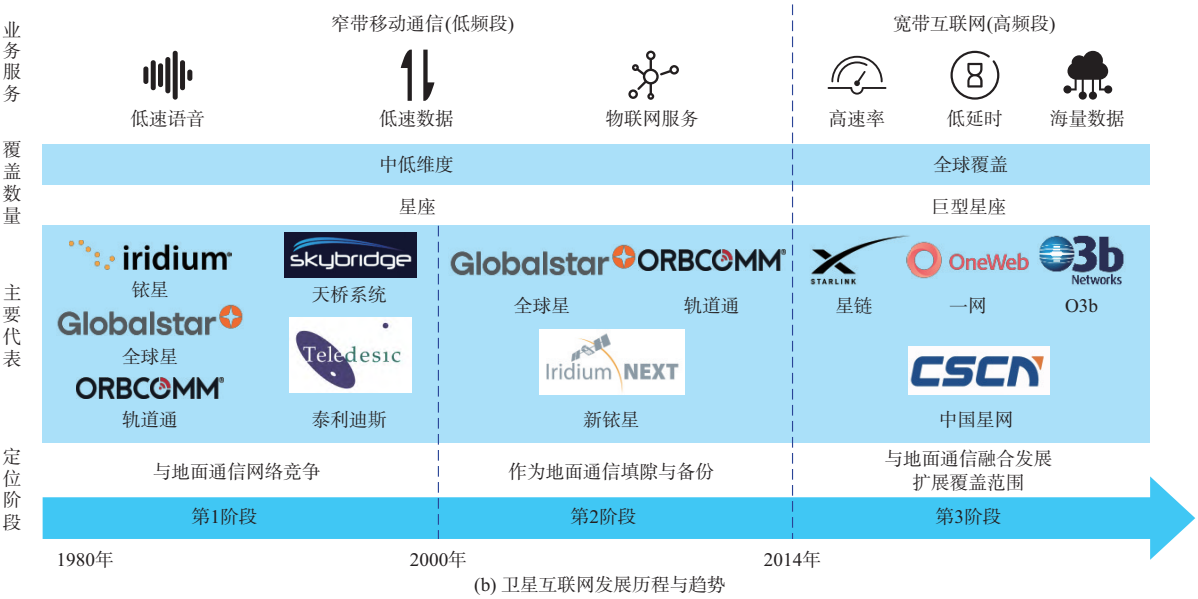
第3阶段：全面商用阶段。在市场需求和技术进步的双重驱动下，近10年来涌现出铱星二代、星链、一网等新型星座系统，实现了天基通信的移动宽带化和宽带移动化[27]。

移动通信技术10年一代，其首要目的是满足人和社会的信息化需求，在需求驱动下技术革新呈现信号从模拟到数字，带宽从低到高，覆盖从点到线再到面的发展趋势。不断催生新应用场景，新场景产生新需求，新需求驱动新技术，不断往复进化。

国外涌现出以星链、一网、柯伊柏等为代表的商业通信卫星星座建设热潮。截至2023年9月，星链累计发射低轨卫星超5 000颗，在63个国家落地并



(a) 通信技术发展历程与趋势



(b) 卫星互联网发展历程与趋势

图3　通信技术与卫星互联网的发展历程与趋势
Fig. 3　Development history and trends of communication technology and satellite Internet

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

提供宽带通信服务，活跃用户数量突破200万。中国提出了多个星座系统建设计划，如鸿雁、虹云星座计划等。银河航天、国电高科、吉利集团等民营公司也开始筹建商业卫星互联网星座。中国卫星网络集团有限公司作为唯一从事卫星互联网设计、建设、运营的中央企业，计划建设高中低轨协同、极轨倾斜轨配合的由海量卫星构成的巨型卫星星座，标志着中国卫星互联网系统建设运行和商业应用步入高速发展轨道。

1.3　卫星互联网能力特征

卫星互联网由空间段、地面段、应用段组成，如图4所示，为新型电力系统提供通信、导航、遥感等大时空尺度综合信息服务[28]。

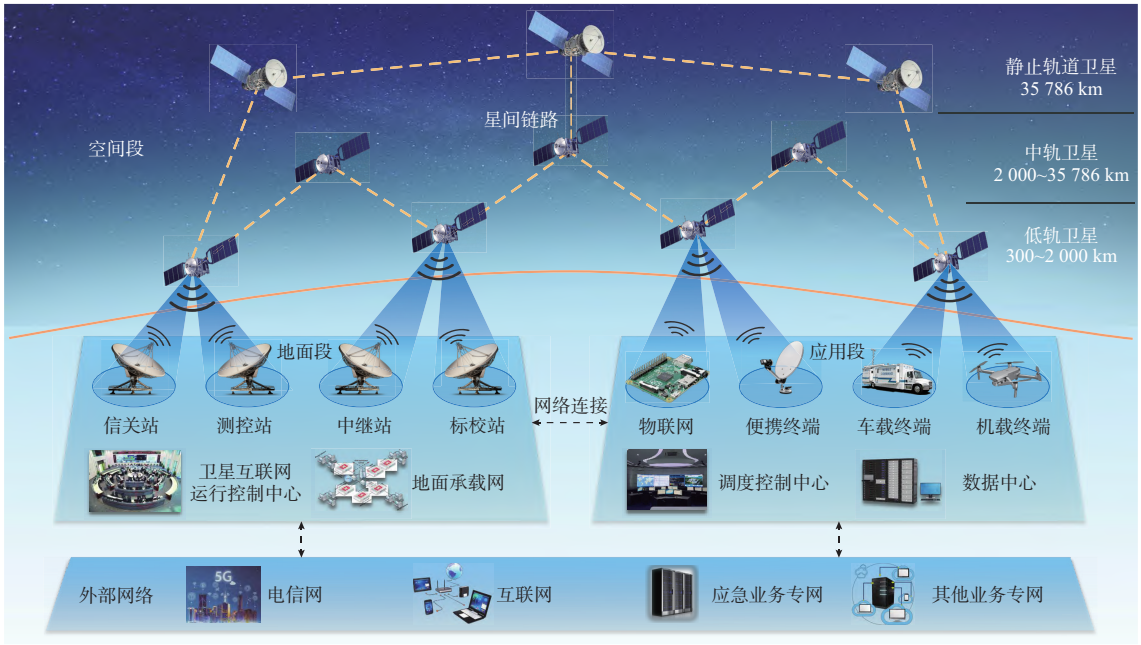


图4　卫星互联网的主要构成
Fig. 4　Major components of satellite Internet

1.3.1　卫星互联网通信

卫星互联网通信是指利用无线电将通信卫星作为中继站在地面站之间高速率转发信息[29]。卫星互联网的通信技术大多利用卫星建立物理连接通道。如图5所示，用户终端将编码成数字信号的数据用特定频率通过地面站发送到卫星，卫星收到数据后，将数据转发给其他预先确定的地面站。目前，卫星互联网主要工作模式有透明转发模式和星上路由交换模式两种。透明转发模式是当前商用主流模式，即应用终端与信关站交互，卫星只起到链路中的中继功能，是天基的信号转发单元，对于链路和传播的信息内容来说，卫星是“透明”的，有效规避了隐私保护等敏感问题，如图5中的传输路径1所示。星上路由交换模式是在提供基础中继功能基础上，赋予卫星较强的星上数据交换能力，同时支持应用终端并发接入链路，实现数据/信息的星上处理、交换、路由等功能，如图5中传输路径2和传输路径3所示。在星上路由交换模式下，传输路径2和3的选择主要由星上数据/信息处理能力决定，即传输路径2是当前星上处理能力受限约束下的折衷，借助地面信关站的算力实现内容的分发路由；传输路径3是未来卫星互联网在具备高性能计算能力后，实现星间自主智能路由的方式。与传输路径2相比，传输路径3时效性更强、隐私性更好，有助于实现卫星互联网服务的个性化、软件化定义。在新型电力系统中，出于隐私保护和信息安全考虑，将采取透明转发与星上路由交换的混合模式来平衡信息传输的时效性和安全性[30-31]。图中：传输路径1为①-②-③，即发出终端-卫星1-信关站-外部网络-接收终端1；传输路径2为①-②-④-⑥，即发射终端-卫星1-信关站-卫星2-接收终端2；传输路径3为①-⑤-⑥，即发射终端-卫星1-卫星2-接收终端2。

卫星互联网中大量低轨卫星的引入可以实现重点区域的多重信号覆盖，并提供更高带宽资源。同时，较低轨道位置使信号传输时延大幅减少，显著提高通信实时性。与传统高中轨卫星星座相比，卫星互联网可以提供更广覆盖、更高带宽、更低时延的语音通信、数据传输和宽带接入等互联网信息服务，支

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

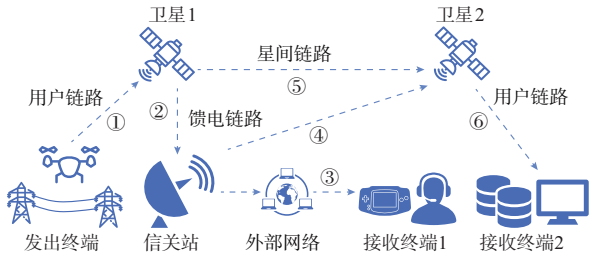


图5　卫星互联网通信
Fig. 5　Communication of satellite Internet

撑新型电力系统实时监测与智能控制。

1.3.2　卫星互联网导航

卫星互联网导航是通过在轨卫星不断向地面广播、发送特定频率，并加载一些特殊定位信息从而实现目标的定位、导航和授时，如图6所示。

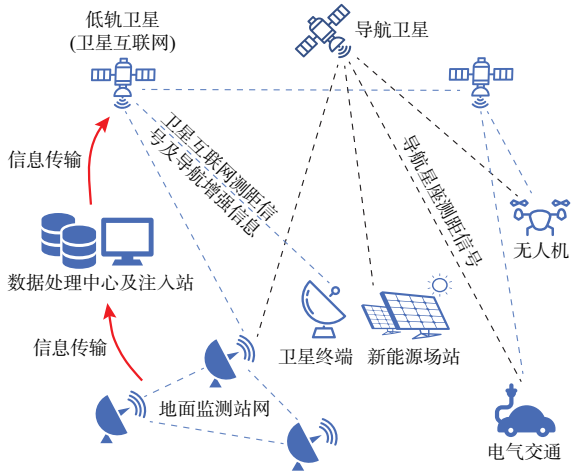


图6　卫星互联网导航
Fig. 6　Navigation of satellite Internet

卫星上搭载精确的原子钟和广播设备，用于发送定位和时间信息，用户终端设备通过其内置的卫星接收设备接收来自卫星的信号。卫星信号中包含了卫星的时间戳和位置信息，通过计算不同卫星信号的传播时间，确定设备与每颗卫星的距离，用户终端设备通过距离信息进行三角测量，以确定自身的位置。目前，全球四大卫星导航系统包括中国的北斗卫星导航系统（BeiDou navigation satellite system，BDS）、美国的全球定位系统（global positioning system，GPS）、俄罗斯的格洛纳斯卫星导航系统（globalnaya navigatsionnaya sputnikovaya sistema，GLONASS）和欧洲的伽利略卫星导航系统。此外，天基增强系统通过大量位置已知的差分站获得伪距、卫星播发的相位等原始定位数据并发至主控站进行计算，得到的定位修正信息发送给卫星，再将修正信息播发给用户，从而提高定位的精度。地基增强系统则是通过基准站将采集到的观测数据传输到数据中心，使用网络实时动态定位技术处理后向用户发送修正数据，实现厘米级、亚米级的增强服务。

卫星互联网中大量低轨卫星的引入可以弥补卫星导航系统在信号衰减和播发速率低的缺陷，利用传输距离短的优势减少信号损耗，并且将低轨通信卫星作为中继播发导航卫星信息实现导航信息的天基增强，联合星载数据与地面观测基站，为位置感知、导航领域提供更高定位精度，拓展新型电力系统物联网等应用。

1.3.3　卫星互联网遥感

卫星互联网遥感是通过搭载光学、雷达、红外、微波等不同类型的有效载荷，将捕捉到的地球表面电磁辐射等数据转换成数字信号传输到地面控制站或数据中心。数据到达地面后，进行纠正传感器误差、大气校正、几何校正等处理，确保数据的准确性和一致性[32]，可实现电力基础设施监测、线路巡检等，如图7所示。卫星遥感系统分为遥感卫星分系统、地面测控分系统、地面运控分析图、地面应用分系统，其中，遥感卫星分系统由有效载荷与支持平台构成，也被称为空间段；地面测控分系统、地面运控分系统和地面应用分系统统称为地面段，分别用来监视在轨卫星的工作状态、综合管理卫星遥感任务、处理各类遥感数据并进行质量评定。

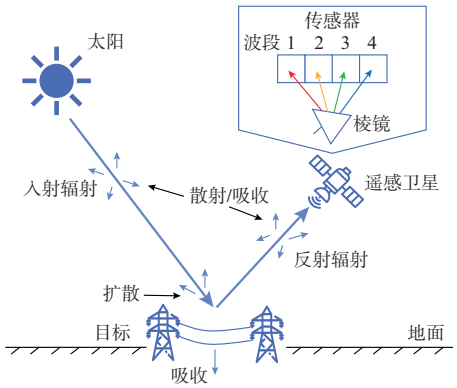


图7　卫星互联网遥感
Fig. 7　Remote sensing of satellite Internet

在卫星互联网中，大量低轨卫星的引入可以实现快速、可靠、实时的卫星遥感数据传输、共享[33]，提升遥感数据分发速率和遥感任务的实时响应速度，提高空间、时间分辨率。通过拥有强大星上智能处理能力的星间链路，将多星协同联动，完成多颗卫星同时处理多个任务，如对地观测、收发信息、信息处理等任务，为地面集中处理数据节省时间，达到空间信息直达用户的目的。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

1.3.4　卫星互联网通导遥融合赋能应用

卫星互联网的通导遥融合是指同时提供定位、导航、授时、遥感、通信多种服务和功能的一体化天基信息服务系统[34]，通过一星多用、多星组网、天地互联技术提升遥感信息粒度、导航定位精度、通信覆盖范围和服务能力。遥感信息可实现分米级空间分辨率、分钟级时间分辨率；导航服务可实现分米级定位；通信可实现全球话音、图像和视频覆盖。

卫星互联网的主要波段与各波段典型功能[35]如表1所示，各业务所涉及波段存在交叉重叠，是地面通信网络在偏远地区与特殊场景下的优势补充和有力竞争。表2为通导遥融合的卫星互联网在通信可靠性、精确性、时效性等性能指标上与当前电力系统所应用的地面通信网络的对比结果，凸显了卫星互联网的技术优势和成本优势。

表1　卫星互联网主要频率波段与业务

Table 1　Main frequency bands and services of satellite Internet

波段	频率范围/GHz	主要典型功能	常见业务
L	1～2	卫星导航	全球定位、精确授时
S	2～4	无源遥感	监测海洋盐浓度、海洋表面温度、土壤湿度、植被指数等
C	4～8		
X	8～12	遥感与测控	商业遥感探测，空间研究业务（如探月工程）测控
Ku	12～18	遥感与通信	航天飞机和空间站的空间通信
K	18～27		雷达业务，实验通信
Ka	27～40		高速率数据传输
Q	30～50		低轨高速率通信卫星星座
V	50～75		

表2　卫星互联网与地面网络的性能对比

Table 2　Performance comparison of satellite Internet and terrestrial network

网络	最小时延/ms	理论带宽	平均丢包率/%	用户容量	覆盖距离	传输方式	建设成本/亿元	年运营费用（电费）/亿元
卫星互联网	20～35	1 Gbit/s	0.9	单星通信容量为17～23 Gbit/s	550 km轨道高度的天线覆盖640 000 km^2	长距离无线传输	962	25.7
4G	10～20	300 Mbit/s	0.05	10万终端/km^2	半径300 m	光纤传输		
5G	1	1～2 Gbit/s	＜1	100万终端/km^2，单个宏基站≥20 Gbit/s	半径约1～3 km	光纤＋中远距离无线通信	6 000	231.1

2　卫星互联网赋能新型电力系统创新应用

新型电力系统是信息物理耦合的复杂系统，在广域空间内，新型电力系统的各个环节表现出显著的数据异构多元、时空尺度多样、指控需求频繁等特征。传统电力系统基于卫星构建了有限带宽、有限资源和有限功能的广域信息采集和处理模式。然而，在海量分布式单元接入新型电力系统后，传统电力系统的卫星应用范式与卫星服务能力难以满足新型电力系统的精细化运行需求。

空天地一体化是新型电力系统精细运行的重要支撑，而卫星互联网是实现空天地一体化，将精细运行贯彻至新型电力系统结构、业务和控制的新质赋能力量。如图8所示，在卫星互联网通导遥融合的支撑下，新型电力系统将实现广域智慧无人作业体系升级迭代，代替现有人工执行中的高危性、重复性、适应性业务，支撑电力系统高效化、智能化运行，即带电作业等高危性业务、绝缘保护检修等重复性业务和极端气候下运维等适应性业务将由无人机、智能传感器等无人装备完成，促进新型电力系统整体高效化、智能化转型升级，为其迭代提质增效。

2.1　卫星应用现状

当前电力系统应用的卫星服务主要由中高轨卫星提供，以导航授时为主，遥感业务次之，通信业务较少，通导遥应用服务分立，虽已覆盖电力系统发、输、变、配、用电等多个应用环节，但仍处于试点试用阶段[35-38]，尚未推广渗透电网态势感知、决策分析、巡视检修、防灾应急等新型电力系统核心业务流程，卫星互联网新能力与新型电力系统新需求未深度融合。

2.1.1　卫星通信电力应用现状

电力系统通过卫星通信传输短报文信号，在输

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

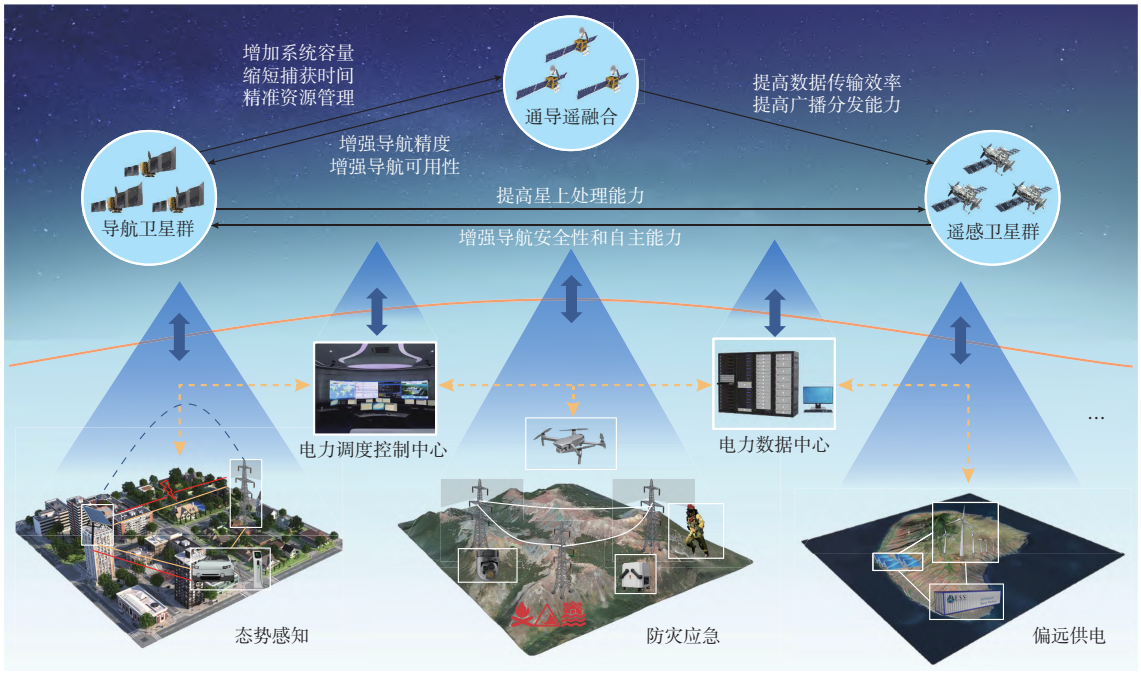


图8　卫星互联网赋能新型电力系统的典型应用场景

Fig. 8　Typical application scenarios of satellite Internet enabling new power system

电线路、杆塔监测巡线等特殊场景下，目前已有部分地区为电力系统运维检修人员配备了北斗指挥机、北斗天通手机和北斗短报文平板终端等野外通信装备作为常规地面通信的补充，借助北斗短报文通信功能实现通信的基础备份[39]。2023年4月，云南电网有限公司在偏远山区通过卫星通信终端实时传输输电杆塔监测视频图像信号，实现了与电网监控中心的准实时通信。

新型电力系统中，传统电力业务通信需求仍旧强劲，大规模分布式、间歇性、随机性的光伏、风电等电源装备与电动汽车充电桩、空调等柔性负荷以指数级增长态势接入，新型电力系统的观、测、调、控目标参与主体和参数维数大幅增加，通信速率和带宽需求成倍提升。目前，电力系统利用高轨卫星通信传输的数据结构单一、传输速率慢、数据量少、通信成本高，难以满足新型电力系统的运行需求。

2.1.2　卫星导航电力应用现状

卫星导航服务包含定位和授时，在当前电力系统中应用有限[40-41]。授时功能为同步相量测量单元(phasor measurement unit，PMU)提供了广域的时间同步信号，在定点监测和巡视检修业务中，基于BDS提供的位置与时间信息，在地质灾害多发的高危地带输电线路和杆塔布置倾斜传感器以监测姿态信息。对于输电廊道的巡检，基于卫星导航通过与地面基准站信号融合实现巡检无人机的亚米级定位和自主起降。在配电网层面，卫星导航提供的对时、授时服务为配电自动化系统提供时空信息基准，实现对故障设备定位和告警。

随着新型电力系统数字化、信息化程度的进一步提升，无人作业、智慧作业需求激增。当前的卫星导航在提供精确服务时依赖实时动态差分(real-time kinematic，RTK)技术来实现地面基准站的信号校正与增强，容灾备份能力较弱。在缺乏地面基准站信号的广大海岛、山区等偏远地区，卫星导航定位和授时精度难以保障无人智慧作业的需求。

2.1.3　卫星遥感电力应用现状

卫星遥感的电力应用主要集中在规划和监控层面，包括电力线路设计、电力作业地址监控、山火监测、冰雪灾害预警等。卫星遥感为电力系统提供了多种空间分辨率、时间分辨率和光谱分辨率的对地观测数据[42]，基于此进行输电线路设计可有效避开泥石流、滑坡、洪涝等地质灾害易发区，保证电力设施安全稳定运行[37-38]。在电力系统运行阶段，卫星遥感通过监测电力设备和供电系统的热红外辐射，发现异常热点、覆冰、山火等灾害，及时开展灾害预警处理工作[43-46]。

卫星遥感视点高、视域广、时间延续性好，然而，当前卫星遥感多来自极轨道卫星，成像时间间隔长、卫星数据下行速率慢、数据空窗期明显。新型电力系统需要调度和控制大量灵活的源荷单元，目前的

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

卫星遥感服务能力难以满足新型电力系统对遥感图像随用随取的需求，将制约正常运行场景下系统精细、高效运行控制以及应急防灾场景下系统的供电保障与快速恢复。

2.2　卫星互联网赋能新型电力系统典型场景

相比于传统卫星网络，高中低轨协同、极轨倾斜轨配合的卫星互联网，具有广覆盖、低延时、高带宽、低成本等特征，具备前所未有的大时空新质赋能潜力以支撑新型电力系统空天地一体、通导遥融合的信息化建设能力。广覆盖、低延时广域卫星通信能力之于导航，可扩容单簇导航信号信息量、缩短导航信号传输延时，提高导航精度、速度与可用性；广覆盖、低延时卫星通信能力之于遥感，基于星间/星地链路高带宽、大容量的传输特点，可提高遥感图像、视频等信息传输效率与广播分发能力。高精度、快速的卫星导航能力之于通信，可以通过精准授时同步传输数据，降低传输过程对数据质量的影响，通过精确卫星定轨与地面终端定位实现天基中继、传输链路、地面终端等资源合理配置；高精度、快速卫星导航能力之于遥感，可提高遥感卫星星上处理能力，降低其对地面测控站的依赖，缩短遥感赋能新型电力系统应用的服务延时。

卫星互联网通过在新型电力系统规划建设、预测调度和运行控制等领域以中继到站、区域回传、移动通信、混合多播等方式实现多维度赋能，为新型电力系统态势感知、巡视检修、防灾应急等典型场景提供全新视角及解决方案，如图9所示。新型电力系统建设过程中，卫星互联网的赋能将主要针对极热无风、晚峰无光、大装机、小电量等新能源固有属性以及现有技术条件面临的“传不到、看不到、定不准”的问题，卫星互联网的赋能的过程是全面且渐进的，实现各电力业务与性能“传得好、看得清、定得精”的本质提升，以支撑新型电力系统信息化能力转型升级。

2.2.1　卫星互联网赋能电力系统规划

在电力系统向新型电力系统发展和转变的过程中，海量的新能源、柔性负荷接入系统，深刻改变了电力系统源网荷储各环节的动态和整体系统的运行模态，进而促使新型电力系统在规划时需要将新能源出力特性与地理位置信息相结合，并进行综合考虑，从而实现规划的优化[47-49]。借助卫星互联网通导遥的融合服务能力，新型电力系统能够积累包括卫星遥感图像、低空遥感图像、新能源场站现场视频等音视频数据、高精度位置信息、广域同步时间标签、输配网线路拓扑等时空标识、细粒度高同步性发电数据、负荷用电数据等准实时数据在内的多元异构数据。基于卫星互联网提供的分布在大时空尺度下的多元异构数据是推动新型电力系统规划向需求智能化形成、方案自适应生成、决策自动化迭代、人机简易化协同[48]升级的基础和关键。

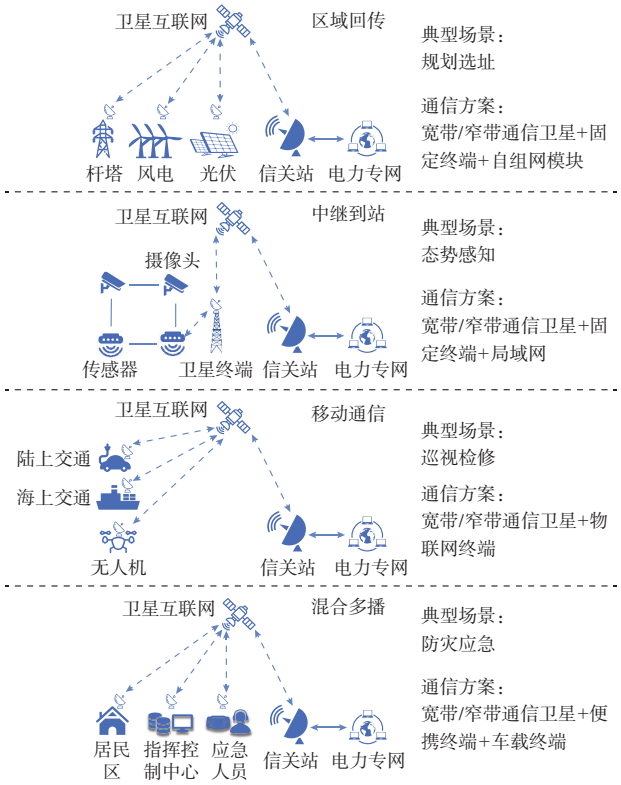


图9　新型电力系统“卫星互联网+”典型应用场景
Fig. 9　Typical application scenarios of “satellite Internet+” for new power system

1）多元环境数据支撑规划决策。新型电力系统在规划不同类型的新能源场站和线路时面临的主要挑战是缺乏历史数据，从而造成规划决策缺乏可靠的数据依据。融合卫星互联网提供的米级到百千米级分辨率气象数据，新型电力系统能够积累细粒度、高质量时空数据，形成海量丰富优质数据库，支撑深度学习等先进方法的训练和应用。在拟建设的新能源场站周围布置边坡检测传感器等装备同时接收BDS与低轨通信卫星的定位授时信号，实现天基定位增强，实时监控地质变化。

2）动态数字地图支撑线路选址。沙戈荒等偏远地区往往蕴含着较为丰富的可再生能源资源，在偏远地区建设大规模新能源场站需要解决的重要问题是电能的可靠外送问题。在规划外送线路的选址时，首先需要掌握详细且精确的地理信息以规避自然灾害频发地段。通过在候选线路附近部署地质、气象传感器，借由卫星互联网对BDS信号、GPS信号进行定位增强，形成时序的高精度地理信息，并通

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

过卫星互联网的全域通信能力回传，构成点状数据图[50]，由此可以引入黏菌算法、深度学习算法等先进工具计算计及区域内气象与地理条件差异的优化线路选址[51]。

2.2.2　卫星互联网赋能电力态势感知

广覆盖、低成本的卫星互联网通导遥服务是助力电力系统常规业务升级与优化的新型手段。卫星互联网通导遥融合赋能新型电力系统，是负荷需求智能感知、新能源发电预测的输入引擎，是构建大规模传感网络、实现电网状态全面感知的关键枢纽，是电力设备及平台运维全面实现智慧无人化管控的技术支点。

1)高可靠、高精度授时。融合低中高轨卫星导航能力的高可靠、高精度授时是数据采集和传输的基础前提。一方面，4种全球导航卫星系统(global navigation satellite system，GNSS)、低轨导航卫星、低轨通信卫星网络授时互为备用，形成“4＋1＋1”的多模高可靠授时模式，在新型电力系统需求侧配置多系统导航信号接收终端。当卫星无线电导航业务(radio navigation satellite service，RNSS)导航信号收发正常时，地面终端同时接收4种典型GNSS信号，实现多系统多频段联合解算。当授时对象上空无中高轨可见星、RNSS导航信号因地貌遮挡不可达、RNSS导航信号因云雾折反射衰减时，地面终端将迅速切换至低轨卫星自主授时或低轨卫星网络授时模式，避免单一模式授时失效，影响新能源场站数据采集质量、水电机组开停机同步性等性能。另一方面，基于GNSS精密单点定位技术，形成纳秒级钟差解算精度授时方案，支撑新型电力系统数据采集层获取时间同步误差小的高可用性数据资源，数据传输层进行分时隙数据吞吐与传送，避免出现通信信道业务碰撞现象，实现数据快速回传与转送[52]。

2)新形态感知。作为卫星互联网通导遥服务融合赋能新型电力系统的产物，新形态感知覆盖发、输、配电等多个重要环节。在发电侧，风电、光伏等新能源逐渐成为新型电力系统的发电主体，除常规电压、电流等电气传感网络外，还需构建面向新能源场站片区微气象地理区域、地理环境监测气象传感网络，涉及风速、风向、温度、湿度、气压、降雨、辐射等气象数据的实时采集，实现新能源发电安排、功率控制、预测、暂态稳定趋势等态势的感知[53]。在输变电侧，一方面，基于高可靠授时的PMU形成线路潮流、开关状态、母线电压幅值、相位等电气信息采集层；另一方面，基于卫星遥感终端、巡检无人机、杆塔监控终端等形成输电线路走廊空天地协同信息采集层，实现线路覆冰、导线微风振动、导线温度与弧垂、输电线路风偏、杆塔倾斜、绝缘子污秽等状态感知。在配电侧，基于融合卫星互联网高可靠授时与高带宽、低延时通信技术，研发具备同步采样、高吞吐通信、边缘计算等能力的微型同步相量测量单元(micro-phasor measurement unit，μPMU)，获取配电侧点、线、面不同维度的同步时标数据，实现对配电网分布式电源、电动汽车、储能等柔性设备的实时监测，以及配电台区拓扑、电能质量等系统状态的动态感知。

3)多维异构广域数据分析与智能决策。基于新型电力系统感知层获取的电气数据(如电压、电流等)、环境数据(如场站所处微气象、地理信息等)以及海量运行数据(如设备状态、台账、网架拓扑、用户用能信息等)，卫星互联网可覆盖全业务区域，确保数据的实时传输与共享。将高质量的数据集成到分析系统中，使机器学习算法更好地处理这些数据，实现智能决策，构建反映新型电力系统物理机制和数学原理的智能监测、判别及预测技术体系。

人工智能监测判别方面包括电力系统低频振荡、电压或频率越限、短路故障等大小扰动监测、电网电压、功率、频率安全稳定态势感知等；预测方面包括母线负荷预测、系统负荷预测、新能源出力预测等功能模块；调度方面包括故障恢复、秒级调度、机组组合等系统决策；交易方面包括电价预测、虚拟电厂调度、竞价决策、电力市场用能分析、网络安全防护等系统应用[54]。

卫星互联网通过实时通信、数据高质量传输和全球覆盖，为多维异构广域数据分析与智能决策提供强有力支撑，提高电力系统的效率、安全性和可靠性。

2.2.3　卫星互联网赋能电力巡视检修

新型电力系统巡视检修是掌握电力设备运行状况、消除设备缺陷和异常情况的重要手段。目前，巡视工作仍依赖人工完成，对作业人员巡视经验要求高，且在环境恶劣地区开展巡视工作难度大；带电检修作业安全防护智能化程度低，作业空间绝缘安全防护主要依赖于作业前安全距离校核，缺少作业中的实时安全监测与预警，作业风险高。卫星互联网通导遥服务能力有助于推动新型电力系统巡视检修的智慧化发展，突破巡视无人化与带电检修安全防护智能化瓶颈，为新型电力系统设备稳定性及可靠性提升赋能。

1)无人化巡视作业。基于输电线路巡视历史数据，利用模式识别、机器学习等手段挖掘巡视异常数据，依据风险水平划分高、中、低风险巡视区域。不同风险区域设定不同巡视周期，高风险巡视区域巡

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

视周期最短，中风险巡视区域次之，低风险巡视区域巡视周期最长。在作业过程中，利用无人机搭载摄像头、红外检测仪、电场传感器等设备，观测、检测线路本体、附属设施及线路保护区出现的缺陷或隐患，掌握线路运行状况。利用卫星互联网高精度定位功能模块与地理信息系统提供精确实时位置信息的功能，规划无人机巡视作业路径，在实现无人机智能操控的同时也有助于提升巡视精度。在无通信基站或通信信号较弱的偏远地区，利用卫星互联网广覆盖通信的功能，构建作业现场和远端控制中心的信息双向传输路径，实现新型电力系统无人化巡视作业的操控和巡视数据的传输[13]。

2）带电检修安全防护智能化。利用三维点云技术构建待检修输电杆塔与线路的三维模型，基于带电作业间隙安全评估模型计算全工况下最大作业危险率，初步评估带电作业的风险。利用卫星互联网导航能力，基于RTK技术获取作业过程中作业人员躯干及四肢的精确定位。基于位置测量数据，利用安全评估模型计算实时作业危险率，评估当前状态是否处于危险状态，实现带电检修作业过程中的实时安全监测和预警，提升带电作业的安全性。

2.2.4　卫星互联网赋能电力防灾应急

中国输电线路覆盖面积广、输送距离长，途经地区地形复杂、高程悬殊、气象多变，自然灾害导致输电线路故障的事故时有发生。卫星互联网广覆盖的优势可以有效支撑输电线路全域灾害监测预警，并为自适应应急通信提供保障。

1）灾害监测预警。以输电走廊地质和山火灾害为例，中国西南地区喀斯特地质地貌和复杂气候环境导致的泥石流、山体塌方灾害频发，对输电线路基础造成了严重威胁，近年来已发生多次地质灾害造成的杆塔受损的事故。中国大量输电线路穿过高山峻岭地带，部分地区因雷击、春耕烧荒等因素导致山火频发，输电走廊山火对线路安全性造成了较大危害。近年来，由山火引发的输电线路跳闸事故逐年增多，山火引起的特高压线路跳闸事故也已发生多次。通导遥融合卫星互联网赋能下，新型电力系统可以实现高精度电力山火预警与紧急控制以及强适应物理信息网络解列、重构与恢复[55]。针对地质和山火灾害的高风险区域，基于灾害历史数据、无人机巡航时间等多维度数据合理部署无人机基站位置，利用自组网技术构建无人机群监测-通信一体化协同网络，实现无人机监测覆盖效率最大化。针对地质和山火灾害的特点，无人机装备有用于地质探测的三维建模采集设备或用于火点识别的红外探测仪，通过三维模型结构分析技术或火点图像识别技术，评估输电走廊受灾情况。利用卫星互联网的通导遥融合应用能力，合理规划无人机群作业路径，并传输高带宽图像数据或低带宽评估数据，实现全天候无人化灾害监测预警。

2）自适应应急通信保障。空天地一体化通信融合天基卫星宽带通信、空基无人机中继和地面移动通信等多分立通信网络，集成卫星互联网覆盖面广、通信延时低、应急反应速度快等天然优势，可在地震、暴雪等严重自然灾害冲击有线电力通信网络终端或通信设备损害时，快速构建应急通信闭环，在电力抢修人员进驻恢复供电过程中提供实时可靠的信息支撑，以最快速度完成灾区信息实时采集、传输、感知与处理，为电力供应快速恢复提供高可靠的通信保障。

2.2.5　星地融合典型系统应用

中国大陆、岛屿海岸线总长度超过32 600 km，海洋资源丰富，并且荒漠化土地面积占中国国土总面积的27%。由于其特殊地理环境与资源开发价值，海底科学观测网、沙戈荒新能源场站将是未来卫星互联网赋能新型电力系统的“试验田”。

1）海底科学观测网。如图10所示，面向海洋全方位综合感知的海底科学观测网包括空天地海一体化网络涵盖卫星通信、海上无线通信、岸基移动通信和水下无线通信等分立通信网络。海底科学观测网作为人类建立的第3种地球科学观测平台，地面电力、通信不可达，需高价铺设海底光电复合缆实现电力供应、通信传输。海底直流供配电系统为海底观测网的供能保障，其安全稳定运行至关重要，尤其是以空天地海一体化网络为多层次感知载体的海底直流供配电系统故障诊断与预测、维修保障[56]。

海底直流供配电系统基于空基、天基、岸基、海基等分立多点网状通信架构，形成“分支单元→海面浮标→无人机中继→卫星互联网→地面运控中心”数据传输闭环，并以此为“丝”，获取海量多维系统运行数据，实现地面运控中心的“悬丝诊脉”式故障实时诊断和短期预测。海面浮标、空基中继通过卫星导航定位自身位置并获取相邻中继位置信息后进行最优自组网，可进一步提升空天地海一体化网络的韧性、抗扰性，确保系统运行数据优质安全。判别并定位海底直流供配电系统故障后，地面运控中心通过卫星导航获取运维船只与人员位置等局部定点信息，结合卫星遥感图像获取当前时刻海面气象信息与运维设备、运维人员的分布情况，制定安全快速的运维建议和策略，缩短海底观测网停电时长，为海底全天候、实时、高分辨率多维立体观测提供电力保障。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

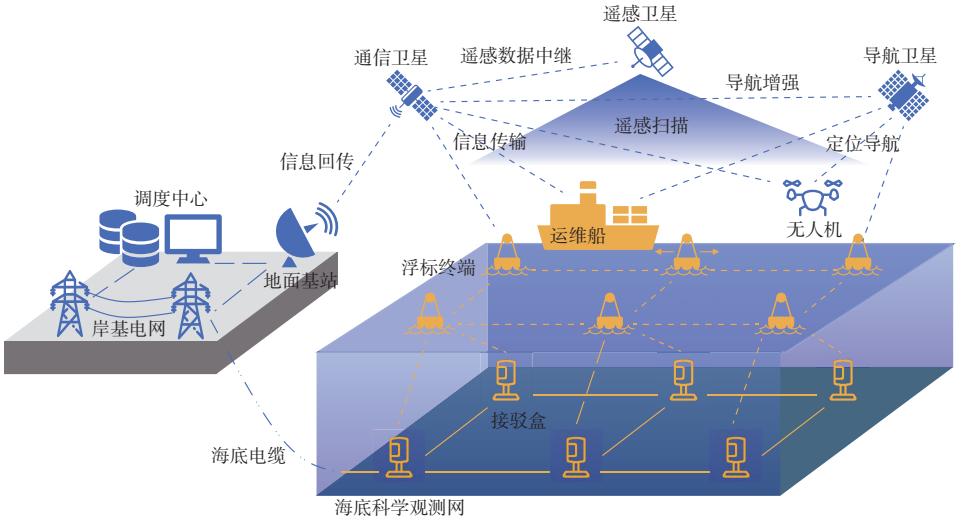


图 10　海底科学观测网空天地海一体化网络
Fig. 10　Air-space-ground-sea integrated network for Seabed scientific observation network

2)沙戈荒新能源场站。沙戈荒地区多位于海拔高度 1 000 m 以上，土地平坦，风光资源条件优越，具有得天独厚的风光储综合开发的资源条件，如图 11 所示。在电源侧，沙戈荒大型新能源场站所在处自然条件恶劣，光照强、风沙多、温差大，已出现基础沉降、沙尘遮挡、设备衰减、组件热斑、支架松动等系列问题，运维成本高、难度大[57]；在电网侧，输电走廊横跨东西，地理环境复杂，状态监测、智能检修难度大。

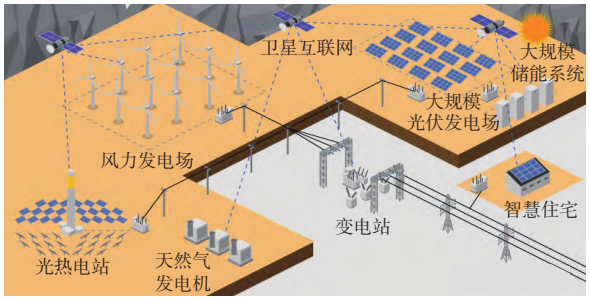


图 11　沙戈荒新能源场站“卫星互联网+”应用
Fig. 11　“Satellite Internet+” application in desert-gobi-wasteland new energy station

卫星互联网赋能服务主要涵盖强不确定性新能源出力快速准确预测、数字化安全监测检修。一方面，依托卫星互联网遥感、通信服务能力，实现场站周围环境温度、湿度、风速、太阳辐射等高分辨率气象数据预测，结合大模型智慧学习能力，构建面向中短期净负荷预测的历史气象数据库与高精度预测模型，以提升“双高”新型电力系统运行规划与调度响应能力；另一方面，由于其所处自然条件恶劣，光照强、风沙多、温差大，容易出现基础沉降、沙尘遮挡、设备衰减、组件热斑、支架松动等系列问题，依托卫星互联网遥感、通信服务能力，融合物联网传感、图像识别、移动互联技术，可实现升压站、太阳能光伏板、风力发电机等站内作业区域数字化监控，提高场站宽范围安全感知、交互与自主能力。基于场站天基遥感卫星成像、空基无人机摄像、地面监控等多维立体遥感观测数据采集和云端分析结果，可指导场站级智能巡检机器人完成常规巡视、故障巡视等智慧无人化作业，降低运维成本和难度。

表 3 总结了卫星互联网赋能新型电力系统的典型应用，梳理了卫星互联网通导遥服务在发、输、变、配、用、调度等电力系统关键环节的典型业务场景。以输电环节巡视检修为例，在输电业务区域，遥感卫星提供了全域感测感知能力，监测输电走廊实时状态；在隐患地区，搭载摄像头、红外检测仪、电场传感器等载荷的无人机借助卫星互联网的精确导航定位能力进行定期无人化巡视作业，识别线路缺陷或隐患，掌握线路运行状况；在重点区域，长期部署的多元传感器实时监测线路运行关键参数，并利用卫星互联网广覆盖通信能力，构建作业现场和远端控制中心的信息实时传输路径。

卫星互联网、无人机、智能传感装备的深度结合共同构建了如图 12 所示的空天地一体、通导遥融合的输电环节分层协同巡视检修新形态。

3　新型电力系统与卫星互联网安全融合

新型电力系统节点众多、网络边界泛化，随着卫星互联网信息化增强易受到网络攻击威胁[58]，存在隐私泄露的风险[59]。在新型电力系统创新应用过程中，虽然推进了能源、信息融合应用进程，但由于卫星互联网应用于新型电力系统中时，其传输方式

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表3　卫星互联网通导遥服务在新型电力系统中的典型应用

Table 3　Typical application of satellite Internet communication-navigation-remote service in new power system

电力系统环节	服务功能	典型业务场景
发电	通信	大规模新能源场站监测数据观测与运行状态控制系统、新能源智能巡检控制、自适应应急通信系统等
	授时	PMU、保护控制装置、事件顺序记录、故障录波器等
	导航/定位	水电站坝体位移监测、海上风电场定位、太阳能追光系统、新能源智能巡检导航等
	遥感	光伏阵列安装选址、风电/光伏等新能源发电预测、新能源无人化智能巡检等
输电	通信	偏远地区通信盲区监控、无人机/直升机/机器人智能巡检控制、自适应应急通信系统等
	授时	雷电定位系统、线路行波故障测距装置、站用/线路故障定位装置或故障指示器等
	导航/定位	输电杆塔位移监测、故障定位测距、输电线弧垂测量、无人机/直升机/机器人智能巡检导航、带电检修安全防护智能设备等
	遥感	输电走廊规划与设计、外力破坏和临近施工定期安全监测、杆塔和电力设施周边地质灾害隐患排查、输电走廊山火监测及火势推演、多源遥感输电线路覆冰预测、预警等
变电	通信	变电站安全监测与管控、自适应应急通信系统等
	授时	变电站保护系统、高压带电绝缘测试系统等
	导航/定位	地基沉降、智能巡检机器人等
	遥感	变电站全景智慧感知、变电站智能巡检等
配电	通信	配电台区监测与安全管控、小微智能传感器配网级同步相位量测装置(distribution-level phase measurement unit，DPMU)数据传输、自适应应急通信系统等
	授时	电流差动保护装置、DPMU等
	导航/定位	分布式电源接入、充电站(桩)、智能巡检、配电自动化终端、配用电侧的电力应急发电车的定位和导航、电力应急抢修可移动手持终端等
	遥感	配电网拓扑识别、中压拓扑辅助校正、配电线路智能巡检等
用电	通信	用电信息采集系统、用电负荷智能启停等
	授时	智能电表、智能终端等
	导航/定位	电动汽车定位、导航优化等
调度	通信/授时/导航	各级调度自动化系统

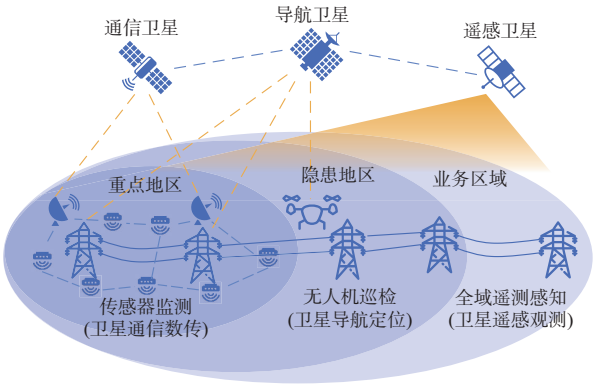


图12　新型电力系统分层协同巡视检修模式

Fig. 12　Hierarchical-collaborative inspection and maintenance mode of new power system

新、融合分界面多，容易成为新型电力系统网络攻击的新对象，保障卫星互联网与新型电力系统深度安全融合面临严峻挑战。隐私保护方面，借助卫星互联网传输的数据可以依赖现有电力系统隐私管理体系，通过所提安全体系增强新型电力系统与卫星互联网融合的安全性。

3.1　新型电力系统星地融合网络安全风险

自2010年起，从电网到卫星网络，从工业小国到工业大国，网络安全事件层出不穷。例如，2010年的“震网”事件使伊朗1 000多台离心机损毁；2015年，乌克兰遭恶意软件入侵电网，导致近140万用户失去供电长达6 h；2019年美国犹他州的可再生能源电力公司遭受黑客发起的拒绝服务(denial of service，DoS)攻击，导致当地以及邻州多个地区出现停电事故；2022年，黑客针对商业卫星网络注入潜伏性恶意软件，导致乌克兰与欧洲的网络连接出现间歇性停滞，严重削弱了乌克兰的通信能力。与上述传统网络安全相比，卫星互联网赋能下的新型电力系统将产生更加多样化的攻击暴露面，网络安全风险呈现出多层次、多角度、高频次的新态势[60]。2022年，针对商业卫星网络的协同攻击是电力系统星地融合网络安全事件的典型案例，美国Viasat公司在欧洲的互联网服务器遭受黑客攻击，黑客借助卫星终端作为跳板入侵卫星网络管理运营系统，导致数万个调制解调器被禁用，多个国家互联网服务中断，并使超过5 800台风力涡轮机失效，电

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

力系统的安全稳定运行受到严重损害。卫星互联网赋能新型电力系统后将出现新型攻击源和攻击方式，其面临的风险来源与威胁方式主要针对现有静态防护机制，如图13所示。

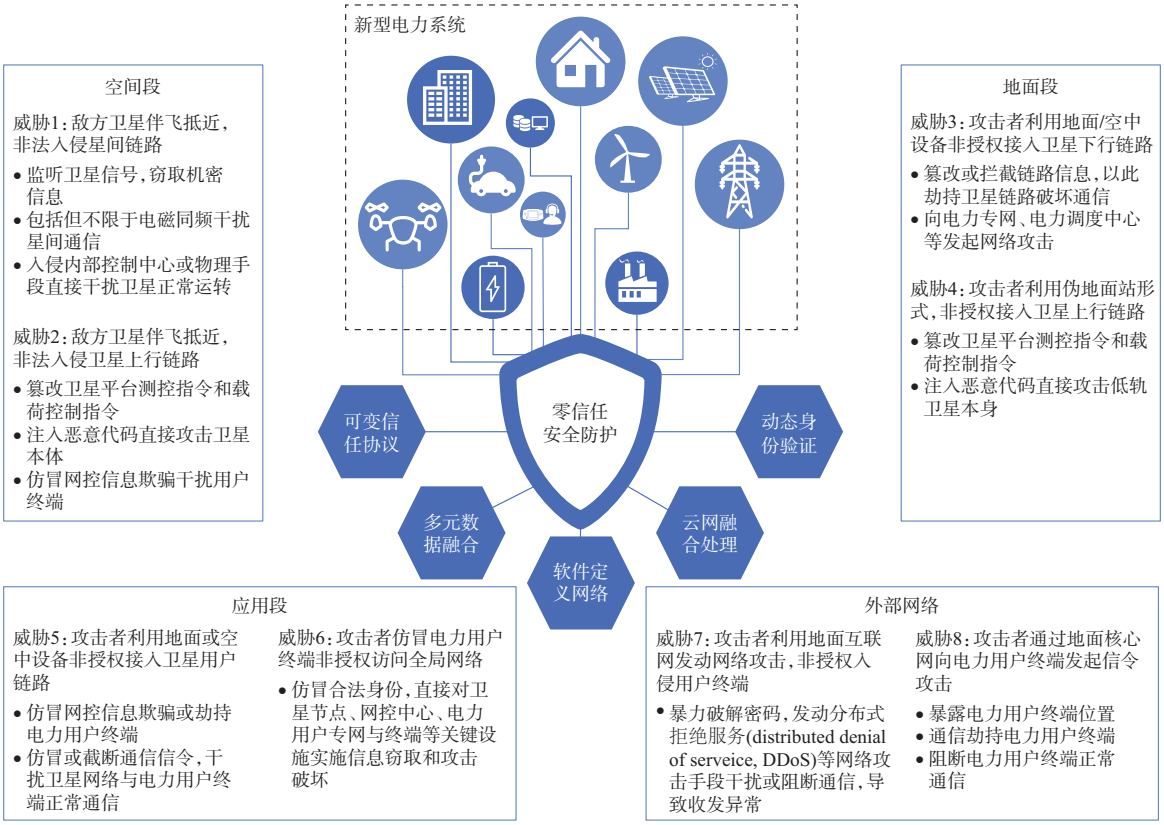


图13　新型电力系统应用卫星互联网时面临的典型网络安全威胁

Fig. 13　Typical cyber security threats to new power system applying satellite Internet

3.2　新型电力系统星地融合网络安全态势

卫星互联网赋能新型电力系统信息网络首要特征是天地一体化传输，公网、专网的融合应用将为内生安全的新型电力系统带来新机遇和挑战[61]。

3.2.1　网络安全新挑战

传统的网络安全静态防御边界适应性日渐降低，安全性能存在局限，在新型电力系统中将面临三大新挑战。

1)网络安全边界模糊淡化。电力网络与外部网络(卫星互联网、地面通信公网、气象网络等)的边界愈发模糊，电力系统经典的“安全分区、网络专用、横向隔离、纵向认证”安全边界纵深防御结构难以适应新型电力系统模糊的安全边界[62]，海量分布式电源、传感器、物联终端的泛在接入直接扩大了新型电力系统的攻击面，高隐蔽性攻击致使传统电力系统静态边界安全机制检测难等隐患逐渐暴露，进一步侵蚀原有信息安全防御边界[63]。

2)卫星网络安全机制尚不完善。卫星互联网节点数量庞大、信号信道开放、拓扑结构灵活、星上网络与地面网络互联互通[64]，地面互联网安全技术应用于卫星互联网赋能的电力系统时，容易忽略天基网络通信链路开放的特征，暴露大量防护短板和漏洞，难以实现全方位安全防护[65]。

3)多元网络接入面临主动性挑战。电力系统被动防御能力包括隔离、查杀等，该方式主要针对已知的网络攻击进行有效防御[66]。随着恶意软件、病毒和新型主动对抗型网络攻击数量增长，攻击方式演变呈现出多样化、规模化、智能化的特征，当前防御方法整体缺乏自适应、态势感知、动态检测并清除系统内外各类已知和未知风险的主动防御能力，难以满足高度信息化的新型电力系统内生安全需求[67]。

3.2.2　安全防护新趋势

卫星互联网赋能新型电力系统的网络安全需要突破传统网络纵深防御体系的适应性和能力局限[68]，建设适应电网和星网多元网络融合、兼顾主动和被动防御能力的弹性动态安全防御体系。

1)安全防护体系化。传统电力系统网络安全防护手段多部署在控制中心、数据中心等重要性强、信息化程度高的区域。新型电力系统中位于网络边缘的电力设施、通信终端、有线通信网络、卫星网络等

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

将成为潜在攻击目标，安全隐患遍布整个系统。构建从物理层到网络层的立体防护体系，防御思路需要转向主被动协同体系化防御。

2）安全防护智能化。传统电力系统安全防御通过风险特征库匹配的方式检测网络攻击[69]，对新型攻击的应对能力较薄弱。新型电力系统的防御体系需借鉴零信任、拟态防御等理念，通过机器学习等方法挖掘系统大时间尺度下多层次行为隐含的信息（终端身份标识和IP变换、电力通信装备上传下载流量动态等），以此建立安全行为基准线，动态智能检测危险行为[70]。

3）安全防护自主化。传统“发现风险，警示风险，解决风险”的防御思路是被动遭受攻击威胁进而获取威胁特征，再采取措施处理威胁，缺乏对电力网络攻击的动态检测、主动发现、快速响应和追踪溯源等能力。新型电力系统的安全防护体系结合卫星互联网高质、高效的通信服务能力，以海量多源异构数据为支撑，推动新型电力系统向态势预测、主动学习、快速响应的积极主动防御转变，实现安全防御自主侦测、自主决策、自主遏制。

3.3　基于零信任的星地融合网络信息安全体系

零信任的原则可以概括为“永不信任、时刻验证”，即遵循“以身份为基础、以资源为核心、持续信任评估、动态访问控制”的理念，本质是在访问主体和客体之间构建基于主体身份验证、可信评估和动态权限分配的访问控制体系[71]，包括网络行为监测、统一身份处理、可变信任评估和基于最小权限原则的访问权限控制。

基于零信任的新型电力系统星地融合网络安全体系具有兼容并蓄的特点：1）通过建立统一的安全互联互通机制和实施一致的安全措施，形成多元网络体系化信息共享与安全防护机制；2）基于容纳云计算、大数据分析、机器学习等先进技术，形成新型电力系统数据的智能化关联分析以及安全管控方案；3）通过制定面向新型电力系统用户、业务和终端的身份健康管理和访问控制策略，形成自主化的持续监测、动态认证和协同决策能力。借助高度包容性的优势，新型电力系统星地融合网络安全防护体系能够有效协调未来电力网络安全防护体系化、智能化、自主化的需求，契合当前安全防护趋势发展，保障新型电力系统在不断演化和复杂化的多元网络环境中的安全稳定运行。

新型电力系统星地融合网络零信任安全体系如图14所示，由计算层（策略引擎）、控制层（策略管理）、执行层（策略执行）构成，主要流程包括信息整合、身份评估以及授权控制3个环节。

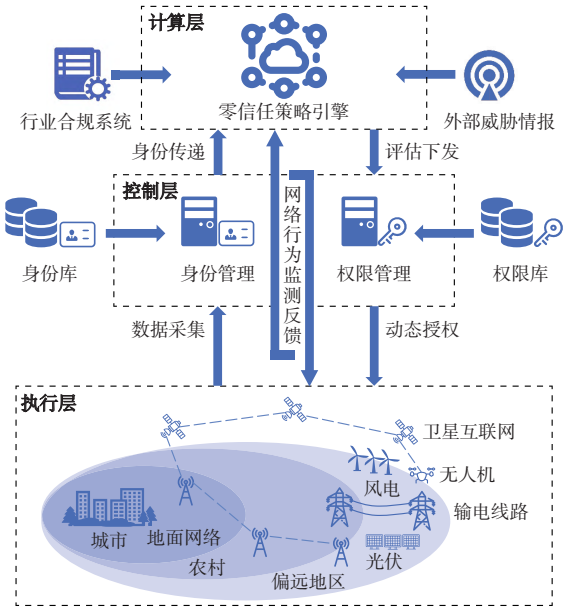


图14　新型电力系统星地融合零信任安全体系
Fig. 14　Framework of zero-trust satellite-ground fusion security system

1）多元信息整合。安全架构的执行层汇聚整合新型电力系统多源异构数据（如融合电力节点网络地址、终端设备型号、流量信息和日志及电气特征量等多个维度的实体信息），并从中提取身份信息，传递到控制层中的身份管理模组，结合身份信息库进行统一辨识、身份匹配，突破了当前利用账号密码、电子令牌、生物特征认证等单一维度信息验证方式在数量、种类、可用性和针对性方面所面临的困境[72]。

2）动态身份评估。计算层中的策略引擎利用身份管理模组中多维度统一身份标识实现可变信任评估，即利用机器学习等方法对多维度身份信息评估量化后，依据Bayesian理论、Dempster-Shafer等理论进行多源信息融合综合评估信任分[73]，并依靠网络行为监测机制，实时监测主体身份状态并传递回策略引擎，保证可变信任评估的实时性、有效性。最后，将信任分数传递回控制层的权限管理模组，作为后续权限分配的依据。

3）最小权限控制。控制层依据最小权限原则，基于计算层的身份量化及信任评估结果控制访问权限并向执行层反馈。凭借对内部网络活动的监察机制，可授予某次电力调度指令和指令发出方初始信任级，并持续监控指令发出方的后续行为。若调度指令发出方后续行为可信，则施加“激励”，准许访问更广泛范围的分布式电源发电信息与负荷数据；若

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

错误授权导致攻击者实施危险活动，则及时隔离制止并进行“惩罚”，实现新型电力系统的零信任安全管控闭环。

新型电力系统星地融合网络零信任安全体系并非创造全新安全架构，而是以新型电力系统实际的安全需求为出发点。该体系将零信任安全与传统安全相结合，利用复杂系统工程思维和先进安全防护理念构建体系化安全架构。通过利用现阶段成熟的信息化技术进行安全架构强化升级，实现了传统安全与零信任安全之间的协调和互动，为新型电力系统提供智能化、自主化的信息安全防御能力[74]。

4　“空天地全面一体、通导遥深度融合”新型电力系统发展趋势及全新形态

当前新型电力系统建设存在的主要矛盾之一是打造空天地全面一体、通导遥深度融合的先进信息化能力需求同性能不足、功能不全、结合不深的电力卫星应用现实之间的矛盾，实质是先进的新型电力系统架构理念同相对落后的信息化生产力之间的矛盾。随着能源低碳转型与数字中国建设的深入推进，当前主要任务是充分发挥卫星互联网新质赋能潜力，推动“卫星互联网＋”新型电力系统垂直应用新模式，为态势感知、防灾应急等多元电力场景提供安全可靠、优质高效综合信息服务[75]。

4.1　新型电力系统与卫星互联网融合实践路径

卫星互联网赋能新型电力系统的发展趋势和实践路径如图15所示。卫星互联网系统将攻关突破一系列核心技术，如星上处理、星间激光通信、组网结构设计、服务质量(quality of service，QoS)路由、星地网络安全、轻量化终端等，实现整体功能和性能的补全、跃升，从而具备面向多元电力业务场景的新质赋能能力。

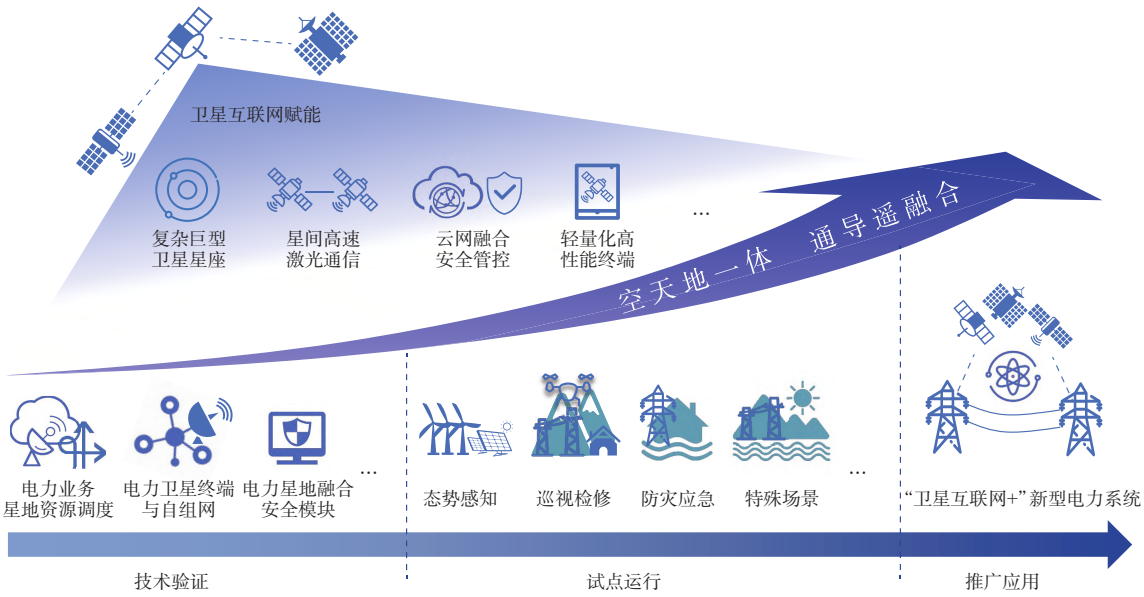


图15　卫星互联网赋能新型电力系统实践路径

Fig. 15　Practical pathways of satellite Internet enabling new power system

卫星互联网具有可实现网络泛在覆盖和多重覆盖的泛在性、根据任务类型对系统进行灵活动态调整的灵活性、协同空、天、地网络间协同工作的协作性等鲜明特征，这些特征使其能够实现对具体业务的快速高效处理。卫星互联网赋能新型电力系统的实践路径为技术验证、试点应用、推广应用3步。

1)新型电力系统星地融合应用技术验证。逐步突破全域覆盖、随遇接入的星地融合电力专网体系架构、星地融合资源规划调度、多元网络互联互通及信息高效传输、轻量化卫星终端及自组网模块等关键核心技术，以零信任安全体系为总体原则构建新型电力系统星地融合技术体系及发展实践路径，在基本电力业务场景中系统性测试卫星互联网的通信、导航、遥感等基本能力，为更广泛的新型电力系统应用场景提供先验实例。

2)新型电力系统星地融合场景试点应用。将卫星互联网能力与电力业务深度安全融合，逐步研发适配新型电力系统的卫星互联网技术与装备，将卫星互联网物联网、数据传输、宽带模组与电力逆变器、断路器、智能开关、零信任安全模块等装备结合，形成系列直连卫星的电力终端装备，支撑电力单元的天地一体化信息能力。进而，在全国新型电力系统示范区、整县光伏示范区、边境电网、海岛电网等典型场景，探索卫星互联网应用潜力并实践多类型

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

应用方案，重点测试实际业务中卫星互联网赋能电力应用能力及性能指标。

3)“卫星互联网＋”新型电力系统全面实践。通过技术验证和试点应用，新型电力系统将全面开展星地融合信息化能力建设，将具有本质安全的零信任安全体系融入小型化、高可靠的电力-卫星装备，推进卫星互联网相关的电力业务固化与关键装备定型，深化星地融合基础设施改造升级，形成系列行业标准与应用推广方案，构建卫星互联网电力应用产业生态，新型电力系统星地融合新质应用进入全面实践阶段。

4.2　新型电力系统与卫星互联网融合全新形态

新型电力系统与卫星互联网的融合呈现螺旋式深化，即卫星互联网的空天地全面一体服务增量能力为新型电力系统业务提质增效，新型电力系统中的应用需求、经验和实践催生上游的卫星互联网技术研发、性能更新与服务模式的升级优化。

1)空天地全面一体。空天地一体化可全面促进新型电力系统的信息物理覆盖式和滴灌式融合，即在原有信息通联的基础上，空天地一体化“覆盖”了新型电力系统的各个节点并伴随信息物理的交互扁平化；同时，新型电力系统的末端在卫星互联网的通信“滴灌”赋能下为主干网带来聚少成多、由远及近的韧性。宏观来看，新型电力系统从当前近似二维的能量分配网络进化为三维的立体网络，借助卫星互联网高速传输的信息数据服务于新型电力系统各级精细化运行目标实现，而传输的电能不仅是大量空天地一体化装备的直接能量来源(卫星终端、全电无人机等)，更是天然的优质时序数据来源和实践基地，通过大量应用，新型电力系统进一步成为大量新型空天技术策源地、驱动源和优质应用场。

2)通导遥深度融合。卫星互联网通导遥融合使得新型电力系统在信息感知、决策分析、巡视检修、防灾应急等方面均呈现“广域智慧无人化”形态。在信息感知层，新型电力系统发、输、变、配、用等多环节采集单元分布密度高、长短序列时间尺度宽、多元异构数据跨级跨域共享、电力数据资源丰富。在决策分析层，新型电力系统具备电压/功角/频率稳定、宽频振荡等安全稳定态势实时分析以及静态安全域、动态安全域、小扰动安全域等状态实时监测等能力。在巡视检修层，新型电力系统以生产控制中心和人工智能大模型为中枢核心，以无人机机巢、卫星、监测装置、巡检机器人等远程作业设备为虚拟班组，依托卫星互联网逐步构建面向巡视、检修、作业、安监等多场景智慧化无人化作业体系。在防灾应急层，构建面向灾区大面积停电场景的“星上云集中处理→精简指令下发→地面低功率设备执行”广义云边协同架构，充分调动空天地计算处理资源，赋予救援车辆、人员进入灾区前的新型电力系统紧急响应能力。

3)新质赋能生产力。在卫星互联网的赋能下，新型电力系统的空天地全面一体化网络既是信息化、智能化和现代化社会的战略性基础设施，也是推进科学发展、转变经济发展方式、实现创新驱动的重要手段和保障国家安全的重要支撑。促进电力系统从单一的能源供应商转变为能源、数据、信息三重驱动的服务商和创造者，能源与信息领域的两大基础设施联动、共建与共享将助力全社会的资源集约利用，打通行业间壁垒，加速学科与行业交叉融合。

5　结语

卫星互联网作为高中低轨协同的全球全域全时新型网络信息基础设施，将在新型电力系统规划建设、态势感知、巡视检修、防灾应急、特殊场景等方面提供新质赋能综合应用，是新型电力系统空天地一体信息化建设的基础支撑、通导遥融合信息化应用的纵深拓展、安全高效信息化升级的关键动力以及新质生产力的新时代科技探索与实践。本文通过回顾卫星互联网的发展历程，总结了其能力特征，提出了卫星互联网赋能下新型电力系统新质应用形式、典型场景、关键技术与实践路径。针对应用卫星互联网时新型电力系统面临的潜在安全风险，提出了星地融合网络零信任安全模式，为推动新型电力系统与卫星互联网跨行业跨领域互联互通深度融合、共建共享协同发展提供理论依据和基础参考。

在卫星互联网的支撑赋能下，新型电力系统将建设成为高速泛在、天地一体、云网融合、绿色低碳、安全可控的典型信息物理系统，成为提高资源利用效率、促进经济社会数字化、智能化转型的重要引擎。在当前强弱电耦合的基础上，新型电力系统展现出多元蓬勃发展的潜力：在信息层面上，卫星互联网等信息层通过深度介入新型电力系统的生产、服务业务，实现新型电力系统从能源核心向提供能源供应和信息服务并举的转型升级；在物理层面上，卫星互联网的深度集成使得硬件装备和控制指令能够实现更加精准和高效的配合，不仅在发电效率、新能源供应可靠性、源网荷储协动、整体韧性提升等方面实现性能的显著升级，更通过智能化、信息化的管理和优化，推动新型电力系统实现感传算存一体、多时空尺度协同运行，为“双碳”战略稳步实现提供技术支撑。

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

参 考 文 献

[1] 郭剑波，王铁柱，罗魁，等.新型电力系统面临的挑战及应对思考[J].新型电力系统，2023，1(1)：32-43.
GUO Jianbo，WANG Tiezhu，LUO Kui，et al. Development of new power systems：challenges and solutions[J]. New Type Power Systems，2023，1(1)：32-43.

[2] 舒印彪，陈国平，贺静波，等.构建以新能源为主体的新型电力系统框架研究[J].中国工程科学，2021，23(6)：61-69.
SHU Yinbiao，CHEN Guoping，HE Jingbo，et al. Building a new electric power system based on new energy sources[J]. Strategic Study of CAE，2021，23(6)：61-69.

[3] 张勇军，羿应棋，李立浧，等.双碳目标驱动的新型低压配电系统技术展望[J].电力系统自动化，2022，46(22)：1-12.
ZHANG Yongjun，YI Yingqi，LI Licheng，et al. Prospect of new low-voltage distribution system technology driven by carbon emission peak and carbon neutrality targets[J]. Automation of Electric Power Systems，2022，46(22)：1-12.

[4] 刘吉臻，王庆华，胡阳，等.新型电力系统的内涵、特征及关键技术[J].新型电力系统，2023，1(1)：49-65.
LIU Jizhen，WANG Qinghua，HU Yang，et al. Connotation，characteristics and key technologies of new power systems[J]. New Type Power Systems，2023，1(1)：49-65.

[5] 胡博，谢开贵，邵常政，等.双碳目标下新型电力系统风险评述：特征、指标及评估方法[J].电力系统自动化，2023，47(5)：1-15.
HU Bo，XIE Kaigui，SHAO Changzheng，et al. Commentary on risk of new power system under goals of carbon emission peak and carbon neutrality：characteristics，indices and assessment methods[J]. Automation of Electric Power Systems，2023，47(5)：1-15.

[6] 康重庆，杜尔顺，郭鸿业，等.新型电力系统的六要素分析[J].电网技术，2023，47(5)：1741-1750.
KANG Chongqing，DU Ershun，GUO Hongye，et al. Primary exploration of six essential factors in new power system[J]. Power System Technology，2023，47(5)：1741-1750.

[7] 徐冰玉，李侠宇.卫星互联网与5G/6G融合发展探析[J].国际太空，2022(12)：28-32.
XU Bingyu，LI Xiayu. Analysis on the integration development of satellite Internet and 5G/6G[J]. Space International，2022(12)：28-32.

[8] DE SANCTIS M，CIANCA E，ARANITI G，et al. Satellite communications supporting Internet of remote things[J]. IEEE Internet of Things Journal，2016，3(1)：113-123.

[9] KAWAMOTO Y，NISHIYAMA H，KATO N，et al. A traffic distribution technique to minimize packet delivery delay in multilayered satellite networks[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology，2013，62(7)：3315-3324.

[10] EVANS B G. The role of satellites in 5G[C]// 2014 7th Advanced Satellite Multimedia Systems Conference and the 13th Signal Processing for Space Communications Workshop (ASMS/SPSC)，September 8-10，2014，Livorno，Italy：197-202.

[11] CASONI M，GRAZIA C A，KLAPEZ M，et al. Integration of satellite and LTE for disaster recovery[J]. IEEE Communications Magazine，2015，53(3)：47-53.

[12] SU Y T，LIU Y Q，ZHOU Y Q，et al. Broadband LEO satellite communications：architectures and key technologies[J]. IEEE Wireless Communications，2019，26(2)：55-61.

[13] 朱亮，戚少博，杨波，等.低轨宽带卫星互联网承载电网业务应用[J].天地一体化信息网络，2023(2)：103-113.
ZHU Liang，QI Shaobo，YANG Bo，et al. Application of the power grid business carrying on low earth orbit broadband satellite Internet[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks，2023(2)：103-113.

[14] 汪际峰，吴小辰，林火华，等.数字电网的概念、特征与架构[J].南方电网技术，2023，17(12)：36-41.
WANG Jifeng，WU Xiaochen，LIN Huohua，et al. Concepts，features and architectures of digital grids[J]. Southern Power System Technology，2023，17(12)：36-41.

[15] 中国南方电网有限责任公司.数字电网推动构建以新能源为主体的新型电力系统白皮书[R].2021.
China Southern Power Grid Company Limited. Digital grid promotes the construction of a new power system with new energy as the main body white paper[R]. 2021.

[16] 中国南方电网有限责任公司.数字电网实践白皮书[R].2021.
China Southern Power Grid Company Limited. Digital grid practice white paper[R]. 2021.

[17] DENG R，DI B，ZHANG H，et al. Ultra-dense LEO satellite constellations：how many LEO satellites do we need?[J]. IEEE Transactions on Wireless Communications，2021，20(8)：4843-4857.

[18] NGUYEN D C，DING M，PATHIRANA P N，et al. 6G internet of things：a comprehensive survey[J]. IEEE Internet of Things Journal，2022，9(1)：359-383.

[19] 张世杰，赵祥天，赵亚飞，等.星地融合网络：一体化模式、用频与应用展望[J].天地一体化信息网络，2023，49(5)：775-787.
ZHANG Shijie，ZHAO Xiangtian，ZHAO Yafei，et al. Integrated satellite-terrestrial networks：integrated mode，frequency usage and application prospects[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks，2023，49(5)：775-787.

[20] SERGHIOU D，KHALILY M，BROWN T，et al. Terahertz channel propagation phenomena，measurement techniques and modeling for 6G wireless communication applications：a survey，open challenges and future research directions[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials，2022，24(4)：1957-1996.

[21] 王羽，李清，李克军，等.Starlink星座应用现状及分析[J].天地一体化信息网络，2023(2)：93-102.
WANG Yu，LI Qing，LI Kejun，et al. Application status and analysis of Starlink constellation[J]. Space-Integrated-Ground Information Networks，2023(2)：93-102.

[22] 禹华钢，方子希.低轨卫星互联网：发展、应用及新技术展望[J].无线电工程，2023，53(11)：2699-2707.
YU Huagang，FANG Zixi. LEO satellite internet：development，application and new technology prospects[J]. Radio Engineering，2023，53(11)：2699-2707.

[23] NGUYEN V，LIN P，CHENG B，et al. Security and privacy for 6G：a survey on prospective technologies and challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials，2021，23(4)：2384-2428.

[24] KODHELI O，LAGUNAS E，MATURO N，et al. Satellite communications in the new space era：a survey and future challenges[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials，2021，23(1)：70-109.

[25] CHEN X M，XU Z B，SHANG L. Satellite internet of things：

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

challenges, solutions, and development trends[J]. Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2023, 24(7): 935-944.

[26] LV J S, LI B, WANG X, et al. An analysis on the characteristics and challenges of global satellite Internet development [C]// 2022 International Symposium on Networks, Computers and Communications (ISNCC), July 19-22, Shenzhen, China: 1-5.

[27] CHAUDHRY A U, YANIKOMEROGLU H. Laser intersatellite links in a starlink constellation: a classification and analysis[J]. IEEE Vehicular Technology Magazine, 2021, 16(2): 48-56.

[28] DUAN T, DINAVAHI V. Starlink space network-enhanced cyber-physical power system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(4): 3673-3675.

[29] 汪春霆，翟立君，卢宁宁，等.卫星通信与5G融合关键技术与应用[J].国际太空，2018(6)：11-16.
WANG Chunting, ZHAI Lijun, LU Ningning, et al. Key technologies and application of satellite communications and 5G integration[J]. Space International, 2018(6): 11-16.

[30] 郑帅.北斗通信技术在电力系统中的应用[J].电子技术，2022，51(11)：104-105.
ZHENG Shuai. Application of Beidou communication technology in power system[J]. Electronic Technology, 2022, 51(11): 104-105.

[31] 齐兆杨.电力系统的应急通信技术应用研究[D].长春：吉林大学，2018.
QI Zhaoyang. Research on the application of emergency communication technology in power System[D]. Changchun: Jilin University, 2018.

[32] 沈学民，承楠，周海波，等.空天地一体化网络技术：探索与展望[J].物联网学报，2020，4(3)：1-19.
SHEN Xuemin, CHENG Nan, ZHOU Haibo, et al. Space-air-ground integrated networks: review and prospect[J]. Chinese Journal on Internet of Things, 2020, 4(3): 1-19.

[33] 彭木根，张世杰，许宏涛，等.低轨卫星通信遥感融合：架构、技术与试验[J].电信科学，2022，38(1)：13-24.
PENG Mugen, ZHANG Shijie, XU Hongtao, et al. Communication and remote sensing integrated LEO satellites: architecture, technologies and experiment [J]. Telecommunications Science, 2022, 38(1): 13-24.

[34] 李德仁，沈欣，李迪龙，等.论军民融合的卫星通信、遥感、导航一体天基信息实时服务系统[J].武汉大学学报(信息科学版)，2017，42(11)：1501-1505.
LI Deren, SHEN Xin, LI Dilong, et al. On civil-military integrated space-based real-time information service system[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(11): 1501-1505.

[35] International Telecommunication Union. The efficient use of the radio-frequency spectrum by all radiocommunication services[EB/OL]. [2023-10-01]. https://www.itu.int/pub/R-REC/en.

[36] 朱秋莎.面向电力应用的高低轨卫星混合组网通信研究[D].北京：华北电力大学，2021.
ZHU Qiusha. Research on hybrid networking communication of high and low orbit satellites for power application[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2021.

[37] KONG X Y, XU Y, JIAO Z B, et al. Fault location technology for power system based on information about the power internet of things[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020, 16(10): 6682-6692.

[38] LIU Q, SUN S L, RONG B, et al. Intelligent reflective surface based 6G communications for sustainable energy infrastructure[J]. IEEE Wireless Communications, 2021, 28(6): 49-55.

[39] 李博，方彤.北斗卫星导航系统(BDS)在智能电网的应用与展望[J].中国电力，2020，53(8)：107-116.
LI Bo, FANG Tong. Application and prospect of BeiDou navigation satellite system (BDS) in smart grid [J]. Electric Power, 2020, 53(8): 107-116.

[40] 薛安成，罗旷，徐飞阳，等.北斗在新能源电力系统的应用[J].卫星应用，2019(7)：28-34.
XUE Ancheng, LUO Kuang, XU Feiyang, et al. Application of Beidou in new energy power system [J]. Satellite Application, 2019(7): 28-34.

[41] MELLIT A, KALOGIROU S. Artificial intelligence and Internet of Things to improve efficacy of diagnosis and remote sensing of solar photovoltaic systems: challenges, recommendations and future directions [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 143: 110889.

[42] 程礼临，臧海祥，卫志农，等.考虑多光谱卫星遥感的区域级超短期光伏功率预测[J].中国电机工程学报，2022，42(20)：7451-7464.
CHENG Lilin, ZANG Haixiang, WEI Zhinong, et al. Ultra-short-term forecasting of regional photovoltaic power generation considering multispectral satellite remote sensing data [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(20): 7451-7464.

[43] 费香泽，杨知，马潇.卫星遥感在能源互联网建设中的应用[J].卫星应用，2021(5)：48-54.
FEI Xiangze, YANG Zhi, MA Xiao. Application of satellite remote sensing in the construction of energy Internet [J]. Satellite Application, 2021(5): 48-54.

[44] 李静，龙强，臧志斌，等.北斗卫星导航系统在电力行业的应用研究[J].电力信息与通信技术，2022，20(10)：87-97.
LI Jing, LONG Qiang, ZANG Zhibin, et al. BeiDou navigation satellite system and its application in power industry [J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2022, 20(10): 87-97.

[45] 穆超.基于多种遥感数据的电力线走廊特征物提取方法研究[D].武汉：武汉大学，2010.
MU Chao. Study on power lines corridor features extraction method from different remote sensing data[D]. Wuhan: Wuhan University, 2010.

[46] 杨淳岚，宁鑫，徐会凯，等.电网山火监测及风险预警技术研究综述[J].电网技术，2023，47(11)：4765-4777.
YANG Chunlan, NING Xin, XU Huikai, et al. Overview of mountain fire monitoring and early warning for power grid demand[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4765-4777.

[47] 高倩，杨知方，李文沅.电力系统混合整数线性规划问题的运筹决策关键技术综述与展望[J/OL].电工技术学报[2023-10-01].https://doi.org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.230478.
GAO Qian, YANG Zhifang, LI Wenyuan. Prospect on operations research for mixed-integer linear programming

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

problems in power systems [J/OL]. Transactions of China Electrotechnical Society [2023-10-01]. https://doi. org/10.19595/j.cnki.1000-6753.tces.230478.

[48] 余涛,王梓耀,孙立明,等.支撑新型配电网数字化规划的图形-模型-数据融合关键技术[J].电力系统自动化,2024,48(6):139-153.
YU Tao, WANG Ziyao, SUN Liming, et al. Key technologies for graph-model-data fusion supporting digital planning of new distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 139-153..

[49] 闫景皓,黄越辉,卢慧,等.爱尔兰岛高比例新能源电力系统运行经验与启示[J/OL].电网技术[2023-12-14].http://doi/org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1782.
YAN Jinghao, HUANG Yuehui, LU Hui, et al. Operating experience and insights from high penetration renewable energy power systems in the Irish island [J/OL]. Power System Technology [2023-12-14]. http://doi/org/10.13335/j. 1000-3673.pst.2023.1782.

[50] 赵俊华,文福拴,黄建伟,等.基于大语言模型的电力系统通用人工智能初探:理论与应用[J].电力系统自动化,2024,48(6):13-28.
ZHAO Junhua, WEN Fushuan, HUANG Jianwei, et al. Preliminary research on generalized artificial intelligence for power system based on large language modeling: theory and applications[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(6): 13-28.

[51] 吴沂洋,刘继春,伍峻杭.考虑不同区域气象与地理条件差异的广域光伏电站规划[J/OL].电网技术[2023-10-01].http://doi/org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1352.
WU Yiyang, LIU Jichun, WU Junhang. Wide area photovoltaic power plants planning considering the differences in meteorological and geographical conditions in different regions [J/OL]. Power System Technology [2023-10-01]. http://doi/org/10.13335/j.1000-3673.pst.2023.1352.

[52] 卢鋆,宿晨庚,吕飞仁,等.基于低轨星座的PNT性能提升技术与能力分析[J].航天器工程,2023,32(4):1-11.
LU Jun, SU Chengeng, LÜ Feiren, et al. Analysis of navigation augmentation techniques and capabilities based on low earth orbit constellations [J]. Spacecraft Engineering, 2023, 32(4): 1-11.

[53] SHEN Y, PENG Y L, SHUAI Z K, et al. Hierarchical time-series assessment and control for transient stability enhancement in islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(5): 3362-3374.

[54] SHI Z T, YAO W, LI Z P, et al. Artificial intelligence techniques for stability analysis and control in smart grids: methodologies, applications, challenges and future directions [J]. Applied Energy, 2020, 278: 115733.

[55] ZHAO N, ZHANG H R, YANG X H, et al. Emerging information and communication technologies for smart energy systems and renewable transition [J]. Advances in Applied Energy, 2023, 9: 100125.

[56] 瞿逢重,付雁冰,杨劭坚,等.应用于海洋物联网的水声通信技术发展综述[J].哈尔滨工程大学学报,2023,44(11):1937-1949.
QU Fengzhong, FU Yanbing, YANG Shaojian, et al. An overview of the development status of underwater acoustic communication technology applied to ocean Internet-of-things [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2023, 44(11): 1937-1949.

[57] 王若为,李音璇,葛维春,等.沙漠光伏电能外送技术综述[J/OL].发电技术[2023-10-01].https:doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.22035.
WANG Ruowei, LI Yinxuan, GE Weichun, et al. Summary of desert photovoltaic power transmission technology [J/OL]. Power Generation Technology [2023-10-01]. https:doi.org/10.12096/j.2096-4528.pgt.22035.

[58] YU Y, LIU G P, XIAO H, et al. Design of networked secure and real-time control based on blockchain techniques[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(4): 4096-4106.

[59] 苏盛,汪干,刘亮,等.电力物联网终端安全防护研究综述[J].高电压技术,2022,48(2):513-525.
SU Sheng, WANG Gan, LIU Liang, et al. Review on security of power Internet of Things terminals [J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 513-525.

[60] HU S L, YUE D, XIE X P, et al. Resilient event-triggered controller synthesis of networked control systems under periodic DoS jamming attacks[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(12): 4271-4281.

[61] 王栋,陈传鹏,颜佳,等.新一代电力信息网络安全架构的思考[J].电力系统自动化,2016,40(2):6-11.
WANG Dong, CHEN Chuanpeng, YAN Jia, et al. Pondering a new-generation security architecture model for power information network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(2): 6-11.

[62] 张涛,赵东艳,薛峰,等.电力系统智能终端信息安全防护技术研究框架[J].电力系统自动化,2019,43(19):1-8.
ZHANG Tao, ZHAO Dongyan, XUE Feng, et al. Research Framework of cyber-security protection technologies for smart terminals in power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 1-8.

[63] LIU R, VELLAITHURAI C, BISWAS S S, et al. Analyzing the cyber-physical impact of cyber events on the power grid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(5): 2444-2453.

[64] 宋宇飞,周文辉,刘建东,等.基于零信任的卫星互联网安全防护研究[J].天地一体化信息网络,2021,2(3):15-23.
SONG Yufei, ZHOU Wenhui, LIU Jiandong, et al. Research on satellite Internet security protection based on zero trust [J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2021, 2(3): 15-23.

[65] 季新生,黄开枝,邬江兴,等.6G天地一体化信息网络内生安全技术[J].天地一体化信息网络,2023,4(2):2-12.
JI Xinsheng, HUANG Kaizhi, WU Jiangxin, et al. Endogenous security for the space-integrated-ground information network in 6G [J]. Space-Integrated-Ground Information Networks, 2023, 4(2): 2-12.

[66] 杨杰,郭逸豪,郭创新,等.考虑模型与数据双重驱动的电力信息物理系统动态安全防护研究综述[J].电力系统保护与控制,2022,50(7):176-187.
YANG Jie, GUO Yihao, GUO Chuangxin, et al. A review of dynamic security protection on a cyber physical power system considering model and data driving [J]. Power System

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

Protection and Control, 2022, 50(7): 176-187.
[67] LAKSHMINARAYANA S, BELMEGA E V, POOR H V. Moving-target defense against cyber-physical attacks in power grids via game theory[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(6): 5244-5257.
[68] 张亮,屈刚,李慧星,等.智能电网电力监控系统网络安全态势感知平台关键技术研究及应用[J].上海交通大学学报,2021,55(增刊2):103-109.
ZHANG Liang, QU Gang, LI Huixing, et al. Research and application of key technologies of network security situation awareness for smart grid power control systems[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 55(Supplement 2): 103-109.
[69] 汤奕,李梦雅,王琦,等.电力信息物理系统网络攻击与防御研究综述:(二)检测与保护[J].电力系统自动化,2019,43(10):1-9.
TANG Yi, LI Mengya, WANG Qi, et al. A review on research of cyber-attacks and defense in cyber physical power systems: Part two detection and protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(10): 1-9.
[70] 刘权莹,李俊娥,倪明,等.电网信息物理系统态势感知:现状与研究构想[J].电力系统自动化,2019,43(19):9-21.
LIU Quanying, LI Jun'e, NI Ming, et al. Situation awareness of grid cyber-physical system: current status and research ideas [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(19): 9-21.
[71] EVAN G, DOUG B. Zero trust networks: building secure systems in untrusted networks [M]. Beijing: Posts and Telecommunications Press, 2019.
[72] LU S, GAO Z, XU Q, et al. Class-imbalance privacy-preserving federated learning for decentralized fault diagnosis with biometric authentication [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(12): 9101-9111.
[73] VELUSAMY D, PUGALENDHI G, RAMASAMY K. A cross-layer trust evaluation protocol for secured routing in communication network of smart grid [J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2020, 38(1): 193-204.
[74] TARIQ M, ALI M, NAEEM F, et al. Vulnerability assessment of 6G-enabled smart grid cyber-physical systems[J]. IEEE Internet of Things Journal, 2021, 8(7): 5468-5475.
[75] YAP K Y, CHIN H H, KLEMEŠ J J. Future outlook on 6G technology for renewable energy sources (RES)[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 167: 112722.

周　全(1989—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:新型电力系统卫星互联网应用技术。E-mail:zquan@hnu.edu.cn

周　柯(1979—),男,博士,教授级高级工程师,博士生导师,主要研究方向:新型电力系统分析与控制。E-mail:zhou_k.sy@gx.csg.cn

金庆忍(1988—),男,博士,高级工程师,主要研究方向:智能传感与数字配电网。E-mail:jin_qr.sy@gx.csg.cn

帅智康(1982—),男,通信作者,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:新型配电系统稳定分析与控制。E-mail:szk@hnu.edu.cn

(编辑　冯慧敏)

Novel Applications of Satellite Internet Enabling New Power System

ZHOU Quan[1], *ZHOU Ke*[2], *JIN Qingren*[2], *SHUAI Zhikang*[1]

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. Electric Power Research Institute of Guangxi Power Grid Company Limited, Nanning 530023, China)

Abstract: Satellite Internet is a new type of global and all-time network information infrastructure that uses large-scale satellite networking and is supported by aerospace, communication, network, and data technologies. Compared with traditional satellite networks, it offers advantages such as wide coverage, low latency, high bandwidth, and low cost. The challenges faced by new power systems in the construction of information capabilities are analyzed, including wide-area coverage, resilience to damage, and vertical applications. The definition and capability characteristics of high, medium, and low Earth orbit coordination in satellite Internet are refined, and practical pathways of satellite Internet enabling new power systems in areas such as power planning, situational awareness, inspection and maintenance, and disaster prevention and emergency response are proposed. A zero-trust satellite-ground fusion based integrated network information security system is proposed to serve as a foundational reference for the establishment, operation, and advancement of a comprehensive integrated space-air-ground and coordinated communication-navigation-remote-sensing new power system. The new-style productivity level is enhanced.

This work is supported by National Key R&D Program of China (No. 2023YFC3321703) and National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. 52125705).

Key words: satellite Internet; new power system; integrated space-air-ground; coordinated communication-navigation-remote-sensing; new-style productivity

(C)1994-2024 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net