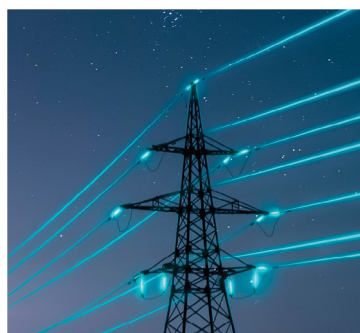
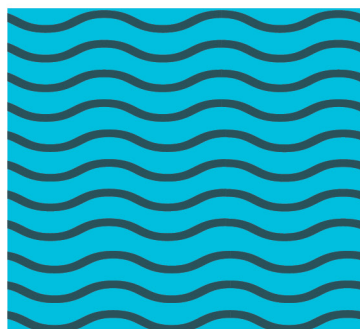


从电网到宽带互联网：可持续和创新的农村连通性电力解决方案



从电网到宽带互联网： 可持续和创新的农村连 通性电力解决方案

2023



致谢

本报告由外部专家Donald Browne-Marke先生和Charlotte Aubin女士为国际电信联盟（ITU）编写，国际电信联盟电信发展局（BDT）的Désiré Karyabwite和Istvan Bozsoki（现已退休）提供了实质性书面输入意见。



打印本报告之前，请考虑到环境影响

© ITU 2023

一些保留的权利。该作品通过创作共享署名-非商业-共享3.0 IGO许可（CC BY-NC-SA 3.0 IGO）向公众授权。

根据本许可证的条款，如果作品被适当引用，您可以出于非商业目的复制、重新分发和改编作品。在使用该作品时，不应建议国际电联认可任何具体的组织、产品或服务。不允许未经授权使用国际电联的名称或标志。如果您改编作品，那么您必须在相同或等效的创作共用许可下使您的作品获得许可。如果您创作了这部作品的译文，你应该加上下面的免责声明以及建议的引文：“这部译文不是由国际电信联盟（ITU）创作的。国际电联对本译文的内容或准确性不承担任何责任。英文原版应为具有约束力的真实版本”。欲了解更多信息，请访问：<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/igo/>。

免责声明

本出版物中所用的称号和本出版物中的材料表示方式并不代表国际电联或国际电联秘书处对各国、领土、城市或地区、或其当局的法律地位、或对其边界划分的观点立场。

提及特定公司或某些制造商的产品并不意味着它们得到了国际电联的认可或推荐，或优先于其他未提及的类似性质的公司。除了错误和遗漏，专有产品的名称以大写字母开头。

国际电联已采取所有合理的谨慎措施来核实本出版物中包含的信息。然而，资料的发行没有任何明确或隐含的担保。资料的解释和使用责任由读者自负。

本出版物中表达的意见、调查结果和结论不一定反映国际电联或其成员的观点。

ISBN

978-92-61-35965-2（电子版）

978-92-61-35975-1（EPUB版）

978-92-61-35985-0（MOBI版）

目录

致谢	ii
序言	ix
内容提要	x
1 背景介绍	1
2 引言	3
3 农村地区宽带接入现状	5
3.1 城市化 – 农村地区人口迁出	5
3.2 农村地区基础设施	6
3.3 互联网接入的城乡差距 – 发展中国家的未联网人口	7
3.4 实现普遍连接	8
3.5 农村宽带基础设施	8
3.5.1 无线接入网	9
3.5.2 移动蜂窝覆盖	10
3.5.3 农村宽带接入基础设施	11
3.5.4 移动蜂窝网络	11
3.5.5 未来5G网络 – 创新业务	13
3.5.6 低地球轨道卫星技术 – 服务不足的农村地区	15
3.5.7 高空平台系统	15
3.5.8 5G基站可再生能源解决方案	16
4 缺乏电力接入	17
4.1 限制宽带扩展的能源挑战	17
4.2 人人享有可持续能源	18
4.3 发展中国家农村电力短缺	19
4.4 向可再生能源基础设施过渡	21
4.5 提高能效 – 优化能耗	21
5 农村电气化可再生能源来源	23
5.1 可再生能源比化石燃料更具竞争力	23

5.2	太阳能	25
5.2.1	太阳能技术概述	27
5.2.2	太阳能阵列布置	28
5.3	确定太阳能光伏阵列规模的考虑因素	28
5.3.1	太阳能逆变器 – 电压转换器	30
5.3.2	太阳能相对于柴油发电机的优势	30
5.4	风力发电	30
5.5	燃料电池	32
5.6	生物质	32
5.7	微水电（Micro-hydropower）	32
5.8	可再生能源的比较 – 总结	33
5.9	离网可再生能源	35
5.9.1	迷你电网	36
5.9.2	独立系统	38
5.9.3	可再生能源和化石燃料能源在迷你电网中应用之比较	40
5.10	迷你电网设施的基本组件：	41
5.11	太阳能供电农村宽带网络 – 苏格兰跳房子（Hopscotch）	43
5.12	混合电力系统	45
5.12.1	混合交流迷你电网	47
5.12.2	混合直流迷你电网系统	47
5.13	太阳能和柴油混合发电	49
5.14	太阳能光伏柴油发电机	50
5.15	储能解决方案	53
5.15.1	铅酸电池	53
5.15.2	锂电池	54
5.15.3	液流电池	55
5.15.4	飞轮	55
5.15.5	固态电池	55
5.15.6	超级电容器	55
5.16	无线电力传输	56
5.16.1	使用通过射频波束进行无线电力传输的电力接入	57
5.16.2	使用通过其他技术进行无线电力传输的电力接入	58
6	可再生能源投资金融机制	61

6.1	农村可再生能源基础设施融资.....	61
6.2	普遍服务基金	62
6.3	外部融资	63
6.3.1	碳销售.....	63
6.3.2	清洁发展机制（CDM）	63
6.3.3	非洲碳信用交易所（ACCE）	64
6.3.4	碳交易所（CTX）	64
6.3.5	非洲可再生能源基金（AREF）	65
6.3.6	电力非洲，超越电网	65
6.3.7	非洲可持续能源基金（SEFA）	66
6.3.8	欧佩克国际发展基金（OFID）	67
6.3.9	国际可再生能源机构（IRENA）	67
6.3.10	可再生能源和能源效率伙伴关系（REEEP）	67
6.3.11	英国国际发展部（DFID）影响力基金	69
6.3.12	可持续能源促进经济发展（SEED）倡议	69
6.3.13	可再生能源绩效平台（REPP）	70
6.3.14	融资方案类别概述.....	71
6.3.15	宽带基础设施融资最大限度地降低私人投资者的风险.....	71
6.3.16	电信和能源携手促进可持续发展	71
7	政策机制和建议.....	73
7.1	引言	73
7.2	数字政策	74
7.3	数字政策考虑	75
7.4	迷你电网运营政策建议	77
7.5	具体的离网政策	78
8	结论	79
9	附件和案例研究.....	80
9.1	能源服务公司	80
9.2	典型的财务、合同和运营解决方案.....	82
9.3	智慧绿色社区	83
9.3.1	智慧社区.....	83
9.3.2	商业模式.....	84
9.3.3	重要服务.....	85
9.3.4	企业社会责任（CSR）	86

9.4	相关链接:	87
-----	-------	----

首字母缩略语	89
--------	----

图、框和表目录

图目录

图1: 2005-2022年互联网用户规模	4
图2: 2022年互联网用户占比	4
图3: 居住在城市地区的人口比例	5
图4: 居住在城市地区的人口比例	6
图5: 2022年城市和农村地区互联网用户比例	7
图6: 电信网络布局	9
图7: 按网络类型划分, 2015-2022年移动人口覆盖率	11
图8: 移动网络架构	12
图9: 5G基站多能源输入系统, 包括可再生能源	16
图10: 宽带在最不发达国家仍然昂贵	17
图11: 无电农村人口	20
图12: 用电人口比例(城市和农村)	20
图13: 2019年至2024年可再生能源发电量增长情况(单位: GW)	23
图14: 按来源划分, 2000年至2040年装机和预计发电量	24
图15: 2018年可再生能源发电成本	25
图16: 太阳能光伏能源价格下降情况	26
图17: 2018年太阳能拍卖最低出价	27
图18: 农村地区典型日负荷曲线	28
图19: 全球平均太阳辐照度	29
图20: 风力涡轮机输出功率与塔架高度的关系	31
图21: 迷你电网细分市场(迷你电网和可再生能源的作用越来越大)	36
图22: 迷你电网功能	42
图23: 交流耦合混合迷你电网电力系统	48
图24: 混合直流电网-风能和太阳能光伏	49
图25: 混合系统不同运行模式的图示	50
图26: 锂离子电池价格调查: 电池包和单体划分	54
图27: 无线电力传输典型场景	56
图28: 点对点WPT图像	57
图29: 使用26 m抛物天线和450 kW、2.388 GHz速调管作为发射机和3.4 × 7.2 m整流天线阵作为接收机进行的1英里点对点电力传输实验	58
图30: 典型磁感应式WPT系统方框图	59

图31: 典型磁共振WPT系统方框图	60
图32: 固定WPT设备示例	60
图33: 行业向绿色能源解决方案过渡每年节省的成本 (单位: 10亿美元)	72
图34: 能源服务公司非洲电力解决方案	81
图35: 电信公司合同和技术解决方案示例	82
图36: 可靠的技术解决方案示例	83
图37: 智能绿色村庄示例	84
图38: 智能绿色社区和可持续发展目标	87

框目录

框1: 移动网络组成结构	13
框2: 华为 – 多层频谱方法	14

表目录

表1: 固定宽带业务的典型速度比较	10
表2: 移动网络的演进	12
表3: 可再生能源的优势	34
表4: 联合国SE4ALL全球跟踪框架11	37
表5: 能源获取干预措施和指示性能源效率效益 – 不同背景下能源获取+能源效率提升方面机会	38
表6: 可再生能源迷你电网和离网特点, 2012/13年	40
表7: 政策分类	76

序言



信息技术（ICT）在实现《2030年可持续发展议程》方面发挥着关键作用。

能源的可用性对于ICT行业、服务和应用不可或缺。大多数ICT都需要电力，为设备充电，为移动基站供电，运行数据中心和支撑网络运行，不一而足。获得可靠和负担得起的电力仍然是一个主要制约因素，特别是在世界最不发达国家（LDC）、内陆发展中国家（LLDC）、小岛屿发展中国家（SIDS）以及农村和偏远地区，在这些国家和地区，人们本可以从ICT的变革性力量中受益最多，但接入电网电力的机会很少，收入也很低。

在仍然没有接入互联网的地方，能源和互联网连接之间存在着共生关系，特别是因为离网（off-grid）商业模式依赖连接进行远程管理。此外，连接的商业模式受益于移动业务（特别是金融服务）使用的增加。

可以利用电力网络扩展国家和农村宽带骨干网。基础设施共享和再利用可以成为节约成本和扩大服务的重要工具，从而凸显ICT和能源行业之间的合作协调对连接农村地区的重要性。

虽然存在广泛的可再生能源来源，但通过传统方法提供这些能源可能很昂贵。安装和维护电线和电缆的费用过高，往往导致农村地区许多人无法获得可靠的电力来源。在这种情况下，空间和新的宽带卫星技术、无线电力传输系统等创新解决方案，可能提供一条具有成本效益的互联网连接之路。

国际电联致力于与利益攸关方合作，改善宽带互联网连接，寻找创新方法，安全有效地向农村和偏远地区提供清洁能源，并实现2015年《巴黎协定》中规定的气候目标。

我们呼吁各国政府、政策制定机构和监管机构相应地审查其国家宽带计划。本文件中的指南旨在帮助成员国、监管机构和私营部门的利益攸关方升级其网络，并整合现代和更节能网络的适当使用，包括无线电力（无需电线的电能传输）和电力线通信。该指南特别有助于国际电联《连通2030年议程》，将每所学校、每家医院、每个主管部门、企业和社区机构连接到互联网，并支持各国加快发展更绿色的ICT、智慧绿色社区和智能电网，以建设更可控、更高效的能源系统。

国际电信联盟（ITU）
电信发展局（BDT）主任
科斯马斯·扎瓦扎瓦博士

内容提要

电力接入是缩小农村地区数字鸿沟和建设全民信息社会的关键。获得可靠和负担得起的电力仍然是一个主要障碍，特别是在世界最不发达国家（LDC）、内陆发展中国家（LLDC）和小岛屿发展中国家（SIDS）以及在农村和偏远地区。电力接入和宽带连接，包括基于信息通信技术（ICT）的服务和应用，在实现可持续发展目标（SDG）以及将全世界目前仍然未联网的27亿人连接起来的努力中发挥着重要的促进作用。

没有电，人们就无法上网，也就无法从现代经济的数字化转型中受益，其中包括教育、卫生、农业和贸易行业。

本报告研究了提供电力接入面临的挑战，而电力对于农村地区接入互联网至关重要。

农村地区缺乏电力接入 - 首要挑战

- 电网接入
 - 无法获得
 - 不可靠
 - 负担不起
- 将电网延伸至农村和偏远地区在经济上不可行，因为：
 - 电网输电和配电网昂贵且庞大
 - 人口密度低，人口分散 - 家庭分散
 - 人口贫困 - 电价低
 - 投资回报率低
 - 缺乏基础设施投资和融资

农村电气化面临的基础设施挑战

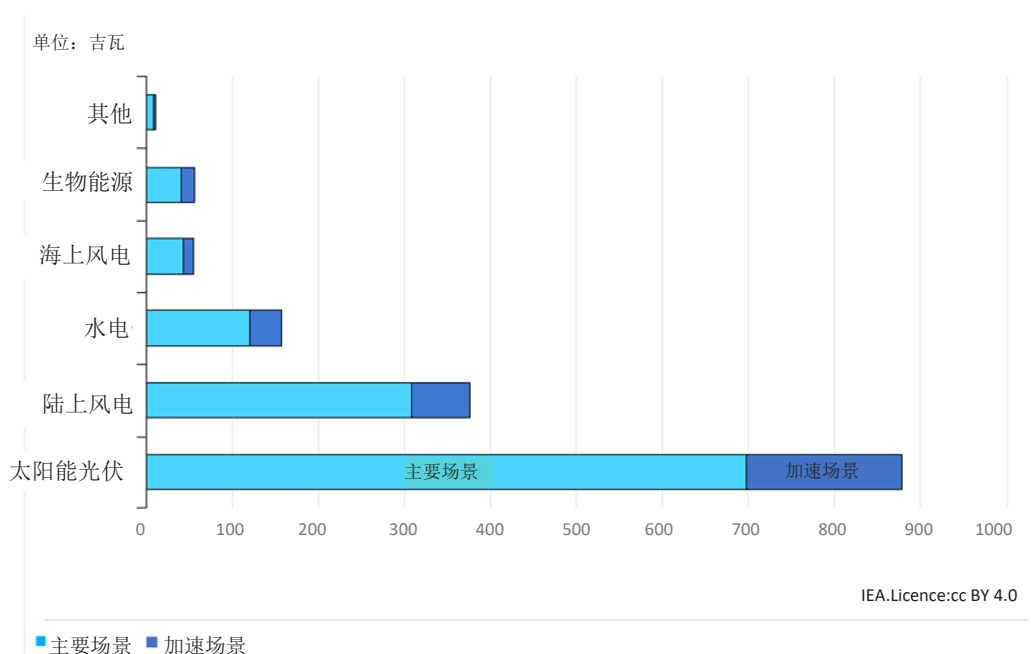
- 地理和地形偏远且具有挑战性
- 缺乏可靠、负担得起和安全的相邻基础设施，如电网
- 缺乏移动互联网覆盖或固定宽带无线接入网络，无法使用国际带宽
- 农村社区缺乏ICT设施
- 移动设备和互联网ICT设备的充电地点有限且距离遥远

- 有限的离网电力解决方案 – 柴油发电机供电不可靠以及可再生能源解决方案的间歇性

在农村地区扩展电网面临的挑战

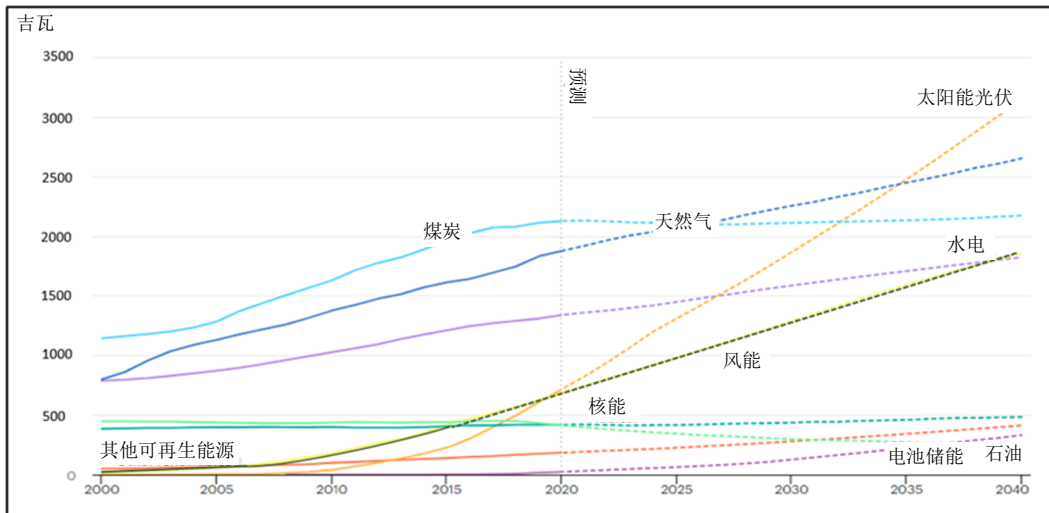
- 国家电网只能在人口稠密的地区进行扩展
- 需要足够的潜在需求来证明输电和配电线路的高额投资成本是合理的
- 基于电网的零售电价 – 补贴和非补贴电价

为了改善电力接入，需要为农村连接提供可持续和创新的电力解决方案，重点是用于农村电气化的可再生能源、太阳能（光伏电池）和风能等成本最低的能源以及其他清洁能源（水电、地热能和生物质能）。下图显示了对2019-2024年世界可再生能源产能增长情况的预测。



来源：国际能源署（IEA），按技术划分，2019-2024年可再生能源产能的增长情况

按能源来源划分，2000-2040年发电装机容量和预测容量



在这种背景下，可以考虑采用无线电力传输（WPT）等新技术来提供具有成本效益的互联网接入。国际电联关于智能能源解决方案的标准，如ITU-T L.1380建议书侧重于电信站点的智慧能源解决方案，当系统由如光伏（PV）电池、风力涡轮机、燃料电池和电网等各种类型的能源供电时，主要侧重于性能、安全、能源效率和环境影响。该建议书还考虑了智慧能源控制。例如，如果电网关闭，如何管理能量流以实现更高的能源效率，如何获得绿色能源等。

ITU-T 1210建议书定义了5G、融合无线和有线接入设备和网络的供电解决方案，同时考虑到其对服务可用性和可靠性的更高要求、新的部署场景以及推荐解决方案对环境的影响。该建议书适用于移动和固定接入网元的供电，特别是针对具有相似配置和需求的设备。

ITU-T L.1382建议书旨在加速网络部署，降低资本支出（CAPEX）和运营支出（OPEX），优化投资效率，并引导ICT产业转型和优化。该建议书中的新网络架构、新供电技术和规范也将有效促进行业技术升级。

最后但同样重要的，光伏板、风能、燃料电池、电网、发电机和电池等多种能源输入都可以连接到一个单一的系统。ITU-T L.1381建议书考虑如何以智能方式控制这些不同的能源输入，以提高能效并减少碳排放。此外，对于智能冷却系统，该建议书探讨了如何利用外部空气进行冷却，以及优化信通技术设备冷却解决方案的方法，例如ICT机架冷却、行冷却法和液体冷却。

1 背景介绍

在卢旺达基加利举行的2022年世界电信发展大会（WTDC-22）将“价格可承受的连通性”作为国际电联电信发展部门的首要重点工作。本重点工作侧重于通过电信/ICT基础设施和服务的部署实现现代化、可用、安全、无障碍和价格可承受的连通性，以弥合数字鸿沟。本重点工作旨在通过利用现有的以及新的和新兴电信/ICT服务和技术及新的商业模式，促进基础设施和服务的发展。在此过程中，向成员国提供了援助，以提高和加强使用电信/ICT的信心和安全性。

2022年11月15日，世界迎来了第80亿个居民，估计全球有53亿人—约占世界人口的66%—已经在使用互联网。但是，根据2022年11月30日发布的国际电联《2022年事实与数据》，全世界还有约27亿人仍然无法上网。在最不发达国家和内陆发展中国家，普遍连接仍然是一个遥不可及的前景，在这些国家平均只有36%的人口处于联网状态。

虽然数据显示固定宽带用户增长缓慢但稳定，但移动方式仍然占主导地位，是在线接入的首选平台，特别是在有线连接稀缺且昂贵的低收入国家，对那些生活在主要城市中心以外的人群而言更是如此¹。

连接是能源密集型的。没有电力，尤其是负担得起、可靠和可扩展的电力来源，连通性就无法发展。联合国表示²，世界继续朝着可持续能源目标前进，但目前的进展速度不足以实现可持续发展目标7（SDG 7），该目标旨在确保到2030年人人都能获得负担得起的、可靠的、可持续的现代能源。因此，需要大力推动。

可持续发展目标7下的具体目标7.1旨在确保人人都能获得负担得起的、可靠的现代能源服务。指标7.1.1侧重于获得电力的人口比例。具体目标7.2旨在大幅增加可再生能源在全球能源结构中的比例。具体目标7.3旨在到2030年将全球能源效率改善率提高一倍。

要实现负担得起的普遍连接的目标，特别是在发展中国家，需要全球协同努力。目前，世界聚焦于努力促进“有意义的普遍连接”，即寻求发挥上网参与的积极作用，同时减轻数字连接的潜在缺点。在2019年报告中，联合国宽带促进可持续发展委员会认识到宽带接入对实现可持续发展目标至关重要。除了简单的可用性之外，宽带接入还需要易于获得、具有相关性且负担得起，还必须安全、可信、增强用户权能并产生积极影响。³

大多数未连接的人口生活在农村和偏远地区，这些地区没有接入电网，而电网可以为移动基站提供负担得起的电源，这一事实极大地限制了宽带业务的普及。国际电联确定，在农村和偏远地区扩展数字电信业务主要是出于与提供移动业务有关的技术和经济考虑。

¹ 国际电联，《衡量数字化发展：2022年事实和数字》。

² 联合国，《2022年可持续发展目标报告》。

³ 国际电联/联合国，国际电联/教科文组织《宽带的状况：宽带作为可持续发展的基础》，国际电联/教科文组织，2019年

此外，除了经济和技术考虑之外，提高数字普及率是实现若干可持续发展目标的关键，如与教育、卫生、金融化、赋予妇女权能、获取知识、服务和商品有关的目标。信息技术和清洁技术领域的技术创新旨在缩小数字鸿沟。

2 引言

接入宽带互联网拥有改变生活、创造机会的潜力，对社区和家庭产生积极的经济和社会影响⁴。高质量高速数据传输可以推动关键经济部门的结构性变革。宽带接入不仅仅是一种便利，它可以为服务不足和服务不及的社区提供重要的信息和服务，并创造有利于社区企业、教育、健康和民生的机会。

宽带促进可持续发展委员会认为，宽带是应对可持续发展目标中强调的全球性挑战的根本。委员会认为，宽带是实施变革性解决方案以促进可持续发展、解决性别平等和促进低碳经济的最有力和最有效的工具之一。

据国际电联估计，2022年，66%的世界人口，即53亿人都在使用互联网（见图1）⁶。在区域层面，在欧洲、独立国家联合体（CIS）和美洲，80%至90%的人口使用互联网。在阿拉伯国家和亚太区域的国家，大约三分之二（分别为70%和64%）的人口使用互联网，而非洲的平均水平仅为40%。

如果按照国家的发展水平划分，最不发达国家和内陆发展中国家的普遍连接仍然是一个遥不可及的前景，这些国家目前只有36%的人口接入了互联网（见图2）。各国在固定连接接入方面的不平等现象远远高于移动连接。虽然固定连接在中上收入和高收入国家的家庭中很常见，但在低收入国家几乎不存在，因为价格高昂且缺乏基础设施。

政府、行业及各界认识到，缺乏负担得起的电力接入是发展中国家农村和偏远地区进一步普及宽带业务面临的一个主要障碍⁷。因此，在这些服务不足和/或服务不及的社区提供负担得起的能源是确保普遍获得宽带业务的关键步骤。

可再生能源行业的发展为利用太阳能、风能和其他可再生资源实施离网、本地来源的清洁能源解决方案创造了巨大的机会。接入这些可靠且负担得起的能源形式，不仅可以降低电信站点和ICT设施的运营成本，而且还有助于减轻贫困，促进农村社区的社会和经济发展。

⁴ 经合组织（OECD），《宽带与经济》DSTI/ICCP/IE(2007)3/ FINAL部长背景报告

⁵ 世界银行，《连接实现包容：人人享有宽带接入》，2015年9月18日

⁶ 国际电联，《衡量数字化发展：2022年事实和数字》。

⁷ http://broadbandcommission.org/Documents/ITU_discussion-paper_Davos2017.pdf

图1：2005-2022年互联网用户规模

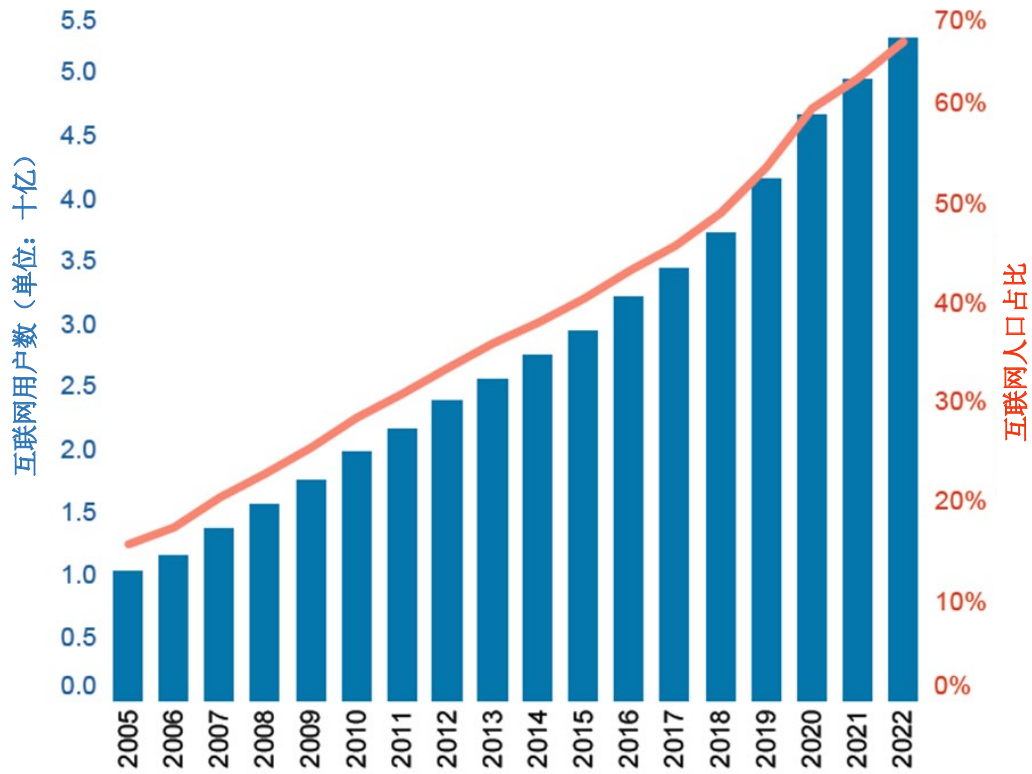
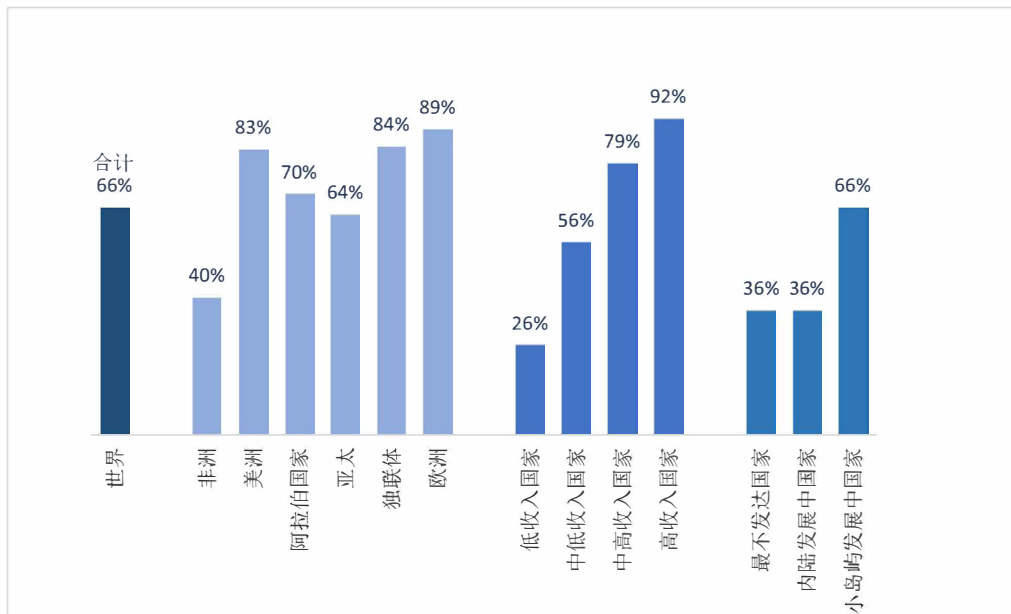


图2：2022年互联网用户占比



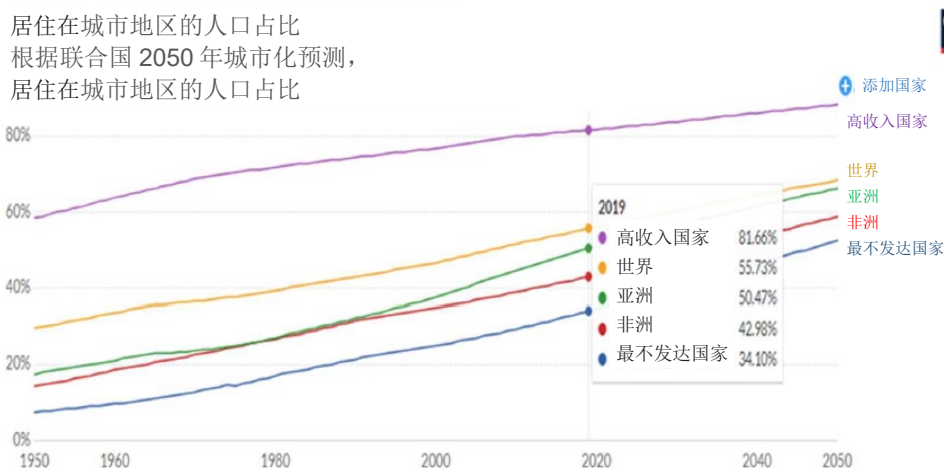
3 农村地区宽带接入现状

3.1 城市化 – 农村地区人口迁出

根据联合国的统计数据，2018年，全球有42亿人（占世界人口的55%）生活在城市地区。亚洲的城市化水平约为50%，而非洲仍以农村为主，43%的人口生活在城市地区（见图3）。

根据联合国预测，人口将逐渐从农村流向城市地区，这可能导致到2050年将有25亿人迁移到城市地区。据预测，这一增长的大部分（估计为90%）将发生在亚洲和非洲。在全球范围内，农村人口在2018年增长到34亿，再经过几年的增长 – 如图4所示 – 预计到2050年将下降至31亿。

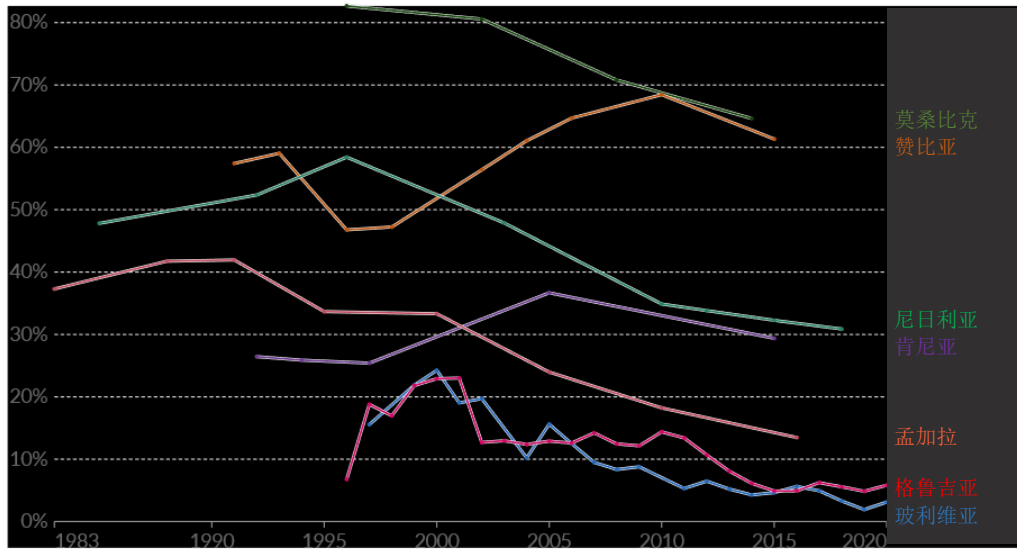
图3：居住在城市地区的人口比例



来源：《用数据看世界》（Our World in Data）（<https://ourworldindata.org/>）

1983-2020年极端贫困人口占比

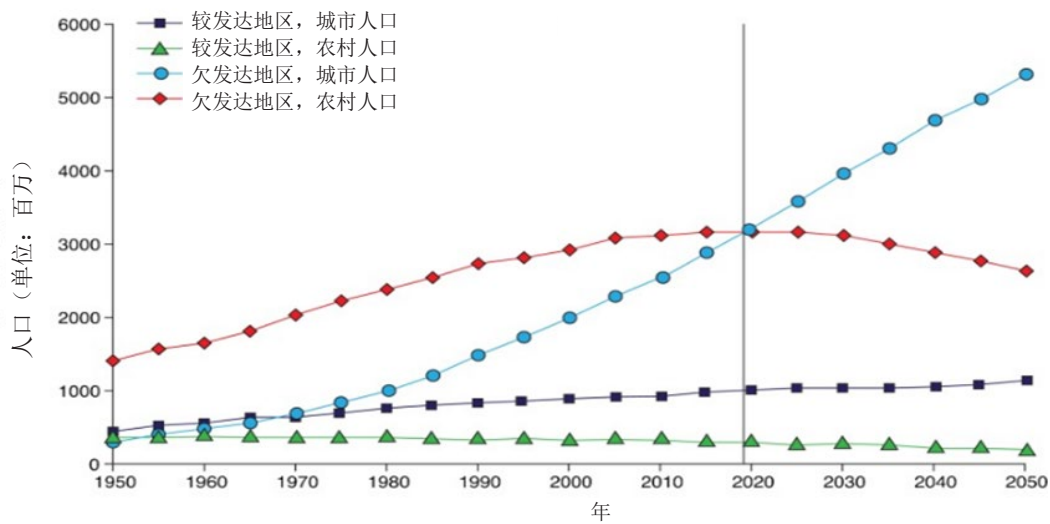
极端贫困是指生活在每天 2.15 美元的贫困线以下。数据根据通货膨胀和各国之间的生活成本差异进行调整。



来源：世界银行贫困与不平等数据平台

注：以上数据以2017年国际美元价格计算。它们与人均可支配收入或支出相关（确切定义所有不同）。

图4：居住在城市地区的人口比例



来源：《用数据看世界》，基于联合国《2018年世界城市化前景》和历史资料。城市地区以各国定义为基础。

3.2 农村地区基础设施

基础设施投资在经济发展中发挥着重要作用。道路、发电和供电、其他公用事业、通信和数字宽带基础设施为新兴经济体可持续发展努力和经济转型提供支撑。为了促进共同繁荣，城市居民享有的社会和经济利益必须与农村人口公平分享，以减少从农村人口向城市地区的迁移。为了确保所有公民都能享受到经济发展和数字社会的好处，无论

他们是生活在城市、农村还是偏远的岛屿社区，关键是要发展互联互通的城乡一体化基础设施，弥合收入较高的城市人口与较贫困农村社区之间的鸿沟。

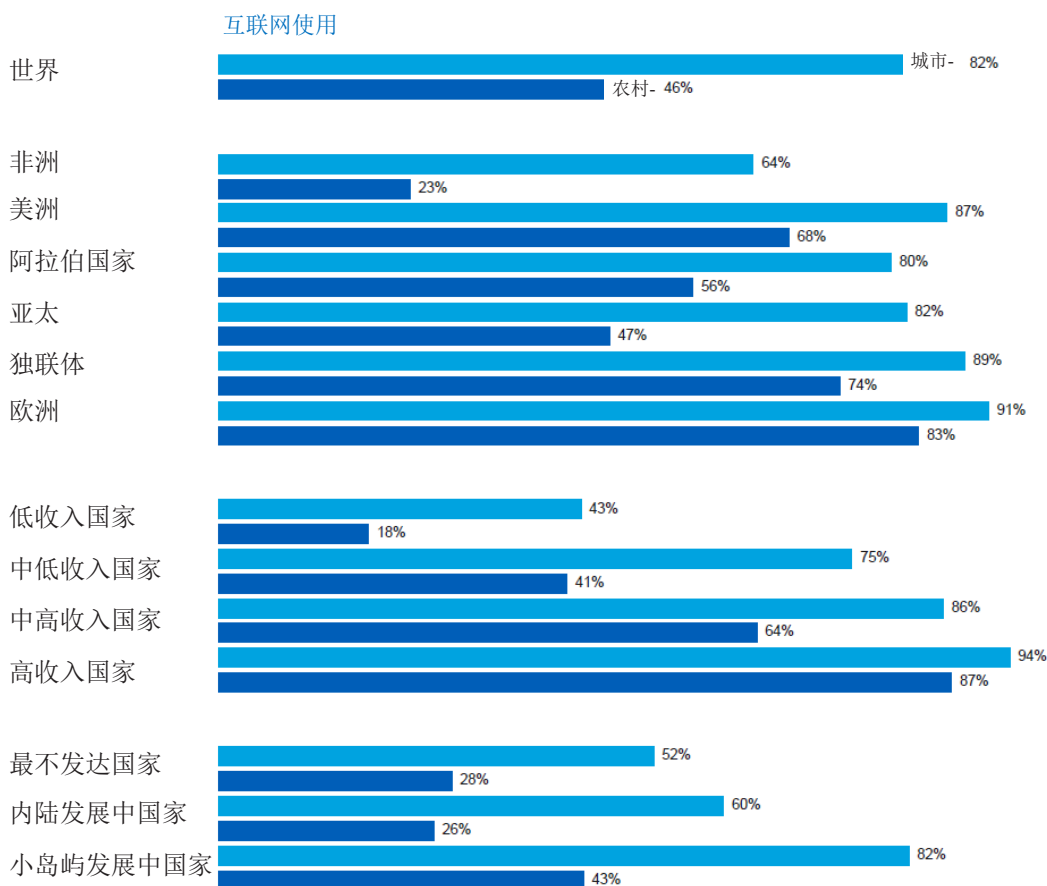
农村地区缺乏电力接入，对经济和社会发展产生不利影响，导致机会匮乏。获得负担得起的电力和宽带基础设施将为农村、偏远和岛屿社区带来数字经济的变革性力量。

举例来说，在非洲总共9亿人口中，目前有6.20亿人没有用上电。这意味着每年损失两个百分点的增长，以及在化石燃料上花费数十亿美元为污染环境的发电机供电。到2030年，整个非洲电网的必要扩张每年将耗资630亿美元。然而，目前每年只投入了80亿美元。如果不逐步实施创新的电力解决方案，非洲很快就会有30万座铁塔依赖柴油发电。

3.3 互联网接入的城乡差距 – 发展中国家的未联网人口

2022年，全球有三分之二的人口接入互联网，能够参与全球数字经济，并从数字生态系统的变革性社会和经济机遇中受益。然而，世界上仍有三分之一的人口没有接入互联网，无法享受数字时代的好处。

图5：2022年城市和农村地区互联网用户比例



在服务不足的社区提供宽带数字服务将减轻未联网社区经历的一些经济和社会劣势。农村企业和家庭手工业将蓬勃发展，因为它们将能够更有效和高效地获取和提供广泛的服务，从而使它们更有能力在更广阔的市场中竞争。

全球移动网络覆盖范围的扩展推动了互联网数据服务的蓬勃发展，这是因为有了经济适用的终端、更便宜的数据计划，以及越来越多的中产阶级能够使用并负担得起所提供的服务⁸，从而增加了互联网的使用。通过把未连接者连接起来缩小城乡数字鸿沟是宽带促进可持续发展委员会的一项重点工作。

3.4 实现普遍连接

宽带促进可持续发展委员会预测，实现互联网的全面普及需要二十多年的时间。在此期间，将开发出大规模的“物联网”，这将预示着克劳斯·施瓦布所描述的第四次工业革命的到来——一系列新技术将物理、数字和生物世界融合在一起，影响所有学科、经济和行业⁹。这些进步将在很大程度上依赖于互联网网络的扩展，以确保普遍接入。

宽带已经成为智能基础设施的基石，各国政府正在制定目标，以实现宽带业务的普及。

3.5 农村宽带基础设施

需要制定有效的战略和政策来缩小世界发展中区域，特别是农村地区在使用方面的差距。可以复制和推广成功的解决方案，以最低的成本改善大量农村未联网人口的连通性。

在农村地区提供电信业务的主要挑战涉及技术和经济方面的考虑。互联网宽带业务的主要传输技术有：光纤系统、铜线DSL（xDSL）/同轴电缆网络、地面蜂窝移动宽带网络、地面微波—固定无线接入网络和卫星网络。每种技术都有特定的优势和局限性，再加上监管环境、商业目标和融资机制，这些都会影响它们的最佳部署位置。

在城市地区，有线基础设施解决方案（如光纤、同轴电缆和铜线DSL）是大多数人选择的宽带技术，用于向家庭和商业场所提供互联网服务。

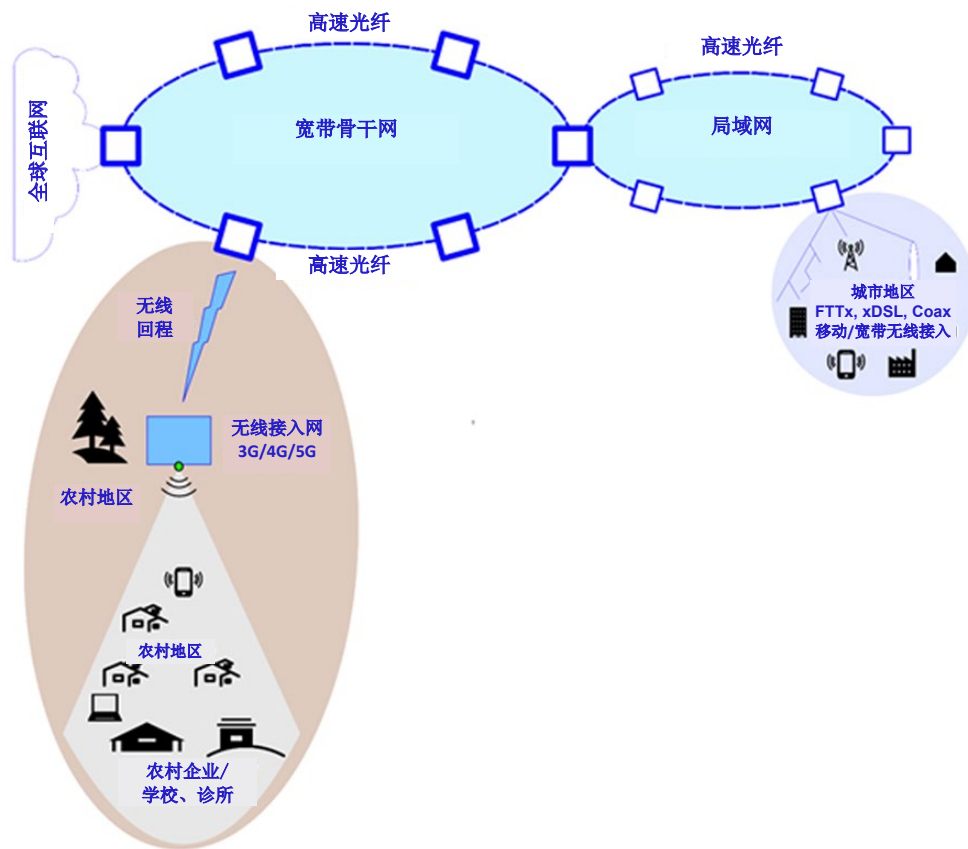
在农村地区，蜂窝移动网络、固定无线接入网络和卫星技术等无线技术往往更具成本效益，并允许更快地推出更易于负担的宽带接入业务¹⁰。利用微波和毫米波无线电技术回程连接解决方案是将农村和偏远社区连接到核心网的最具成本效益和效率的技术（见图6）。回程链路将几个地理上分散的接入节点连接起来，将本地城镇或农村的流量进一步向上汇聚到核心网。

⁸ 麦肯锡，2014年，《离线和掉队：采用互联网的障碍》

⁹ <https://www.weforum.org/about/the-fourth-industrial-revolution-by-klaus-schwab>

¹⁰ ITU-D农村举措网页：<http://www.itu.int/en/ITU-D/Technology/Pages/RuralCommunications.aspx>

图6：电信网络布局



虽然光纤技术可以在长距离范围内提供最高容量，但其安装成本（挖沟、规划和许可等）高昂、准备时间较长，将其作为负担得起的农村基础设施解决方案是不现实的。然而，可以利用光纤技术将超高容量、共享的宽带基础设施从核心网络（长距离）延伸至一国的区域中心和汇聚点。它常常被用于骨干网络，将不同的核心部分、城市和区域连接起来。

3.5.1 无线接入网

在农村地区使用固定无线接入和移动技术的优势包括：

- 快速进入市场 – 因为部署比有线网络更简单，成本更低，可以比光纤技术更快地将用户接入网络，无线网络可以快速实现投资回报；
- 易于部署 – 无线接入适用于人口稀少或偏远地区，以及城市和郊区环境，可用于各种部署场景；
- 即插即用 – 固定无线接入终端易于安装；
- 成本低 – 现有的蜂窝铁塔改造后可以同时提供固定无线接入和移动天线。

表1：固定宽带业务的典型速度比较

技术	峰值速率	平均用户速率
VDSL2	200 Mbit/s	30 Mbit/s
LTE FWA	600 Mbit/s	50 Mbit/s
光纤（FHHT）	1 Gbit/s	100 Mbit/s
数据来源：Ovum		

3.5.2 移动蜂窝覆盖

在大部分发展中国家，移动宽带（3G或以上）接入互联网的主要方式，通常也是唯一的方式。目前，95%的世界人口被3G或以上的网络所覆盖。

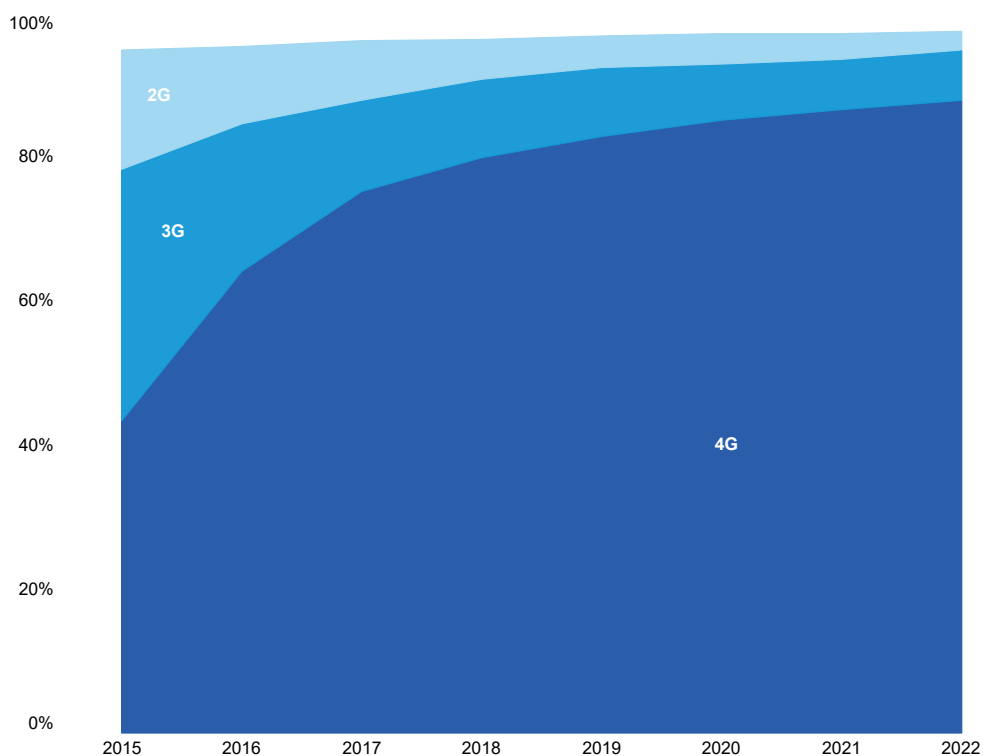
2015年至2022年，4G网络覆盖率翻了一番，覆盖了全球88%的人口（见图7）。在区域层面，美洲、亚太、独联体和欧洲90%以上的人口当前都可以使用4G技术。在阿拉伯国家，仍有四分之一的人口无法使用4G网络，而在非洲，有一半的人口无法使用4G网络。

欧洲和亚太区域的许多国家正在关闭老一代网络，以支持与5G兼容的数字生态系统的发展。这对3G来说尤其如此，3G通常被关闭，而2G则为较老的传统设备保留。

世界上其他区域的路径不那么清晰，主要是因为2G和3G网络仍然占据着重要地位。

世界上几乎所有的城市地区都被移动宽带网络覆盖。但在农村地区仍然存在许多差距。例如，在美洲，22%的农村人口根本没有任何移动信号的覆盖，而另外5%的人口只能接入2G网络，这意味着27%的农村人口无法接入互联网。在非洲，这些数字分别为15%（没有任何覆盖）和14%（仅2G）。

图7：按网络类型划分，2015-2022年移动人口覆盖率



来源：国际电联，《衡量数字化发展：2022年事实和数字》

3.5.3 农村宽带接入基础设施

人口稀少的农村和偏远地区缺乏负担得起的宽带网络。扩展高速基础设施的高成本、低投资回报率和无法接入电网是发展农村宽带基础设施面临的主要障碍。

在没有接入电网的农村地区引入宽带互联网业务的挑战，可以通过研究服务于这些地区的宽带接入网络架构来更好地理解。

有线（铜缆和光纤电缆）和高速固定无线基础设施在主要城市中心广泛使用，为商业和住宅客户提供宽带业务，而移动网络则可随时向城市和农村地区的个人客户提供宽带业务。

3.5.4 移动蜂窝网络

发展中国家的大多数人使用移动蜂窝网络连接到互联网。运营商获得移动频谱许可证，使用基站/蜂窝铁塔网络，并主要销售预付费语音通话时长和数据业务。

在人口稀少的农村地区，蜂窝移动网络主要用于宽带接入，它们在成熟的宽带频谱上运行，使用3G、4G LTE和少数情况下使用新兴5G技术（见图8）。

表2：移动网络的演进

	1G	2G	3G	4G	5G
大致部署时间	1980年代	1990年代	2000年代	2010年代	2020年代
理论下载速度	2 kbit/s	384 kbit/s	56 Mbit/s	1 Gbit/s	10 Gbit/s
时延	不适用	629 ms	212 ms	60-98 ms	< 1 ms

来源：国际电联 – 为5G奠定基础：机遇与挑战，2018年。

从商业角度来看，将宽带覆盖扩展到农村地区具有挑战性，因为在缺乏或无法稳定接入电网的偏远地区，建立和运营基站（包括供电）需要付出高昂的资本支出（CAPEX）和运营支出（OPEX）。宽带提供商需要在当地自行发电以运行中继站和远程变电站¹¹。

GSM协会（GSMA）2016年发布的一份报告估计，与城市蜂窝站点相比，农村和偏远蜂窝基站/蜂窝铁塔站点的CAPEX可能高出30%，CAPEX可能高出100%（来自能源和回程成本），而每个站点服务的用户却少了80%。因此产生的收入较少¹²。

基于Wi-Fi、WiMAX/IEEE和其他专有固定宽带无线接入技术等国际标准，固定无线接入（FWA）技术还用于提供更高质量的服务。在发展中国家，大容量微波和毫米波无线电技术通常作为回程链路提供，将农村社区连接到核心网络。卫星解决方案越来越多地用于在更偏远和封闭的社区提供宽带接入。

开发频谱和能源效率更高、使用可再生能源供电的高容量无线接入解决方案，将加速负担得起的宽带业务在农村和偏远地区的部署。

图8：移动网络架构



来源：改编自国家电联

¹¹ 农村和偏远地区的宽带情况，ITU-D技术文件农村通信，https://www.google.com/search?q=rural+areas+suffer+lack+from+affordable+broadband&rlz=1C1GCEU_en-GB_GB862&oq=rural+areas+suffer+lack+from+affordable+broadband&aqs=chrome..69i57.19862j0j8&sourceid=chrome&ie=UTF-8

¹² GSMA，释放农村覆盖的潜力：商业上可持续移动网络扩展的促成因素。<http://www.gsma.com/mobilefordevelopment/programme/connected-society/unlocking-rural-coverage-enablers-commercially-sustainable-mobile-network-expansion>. July 2016.

框1：移动网络组成结构

一般而言，移动电话和互联网网络由核心、回程和最后一英里部分构成。

核心网（包括国家骨干网和国际连接）包括大容量光纤基础设施，在汇聚点（如互联网交换点和IXP）、一级服务提供商之间的对等连接点和国际连接海缆登陆站传输来往流量。

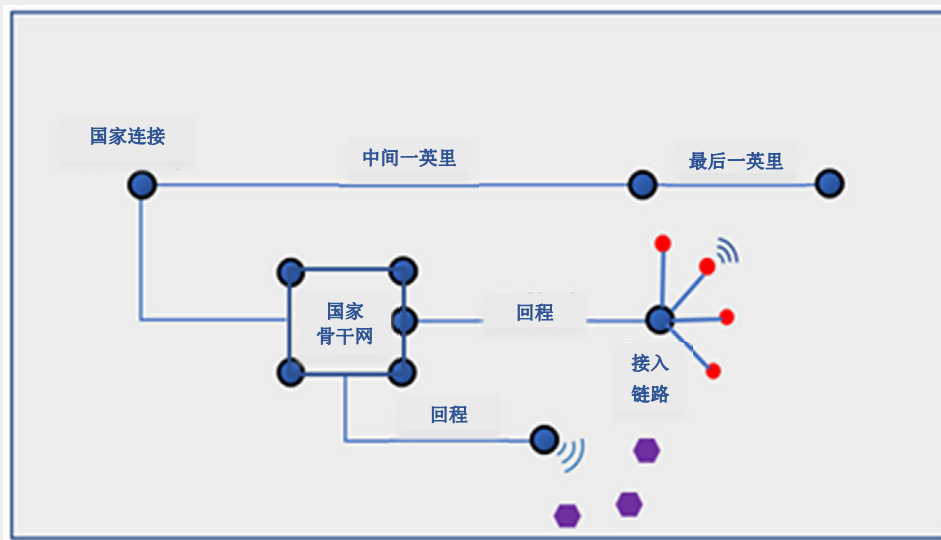
回程（或中间一英里）技术是指将语音和数据流量从运营商的核心网络传输到汇聚点（如基站）的基础设施。回程通常是提供覆盖的主要障碍，特别是在人口稀少的地区或地形具有挑战性的地区，如岛屿或农村地区。

光纤是最常见的回程形式，提供最大的容量和最佳的服务质量。然而，考虑到获得路权和施工许可的相关费用，在农村或地形复杂的地区推广这种技术往往过于昂贵。

微波技术经常用于光纤过于昂贵或不可行的地区。然而，它要求发射机之间有清晰的视距，因此在非常偏远的地区也可能极其昂贵。

卫星回程技术克服了农村距离和地形方面的挑战，但运营成本高，服务质量往往低于传统光纤。

网络基础设施



3.5.5 未来5G网络 – 创新业务

第五代技术（5G）网络正在发展成为一个提供先进通信业务的平台，赋能政府和政策制定机构改造国家基础设施，提供增强型数字服务，支持和赋能公民、社区和企业。

5G将增强最终用户体验、改进性能、提供低延迟和高可靠性。最终，预计5G网络将提供千兆速度。人口密集的城市地区对这些服务的需求最大。由于向农村地区提供这些增强型业务在经济上不可行，因此较低容量的5G业务可能更适合这些地区。

利用地面或卫星网络应用5G将有助于推出一系列新的创新业务，包括远程制造等大规模物联网和应用，而这一切需要时间关键型自动化流程控制、包含电子卫生和智能用药的机器人技术、具有车辆导航和控制的自动化运输、智能电网监控和沉浸式虚拟现实体验，包括在教育和远程医疗领域。

5G网络可以通过使用1 GHz以下的频谱（450-800 MHz UHF频段）促进宽带业务向农村和偏远地区扩展，并将使服务提供商能够以更低的成本覆盖广阔的区域¹³。

5G无线电系统的设计比3G和4G更节能，因此可以使用小规模可再生能源系统为其供电。UHF频谱的传播特性允许链路在更远的范围内工作，与目前3-6 GHz及更高频率和毫米波频段的系统相比，对地球物理障碍物有更好的穿透力。因此，5G基站可以位于更靠近可再生能源的位置，并提供更广的覆盖范围，以更低的成本更有效地覆盖偏远社区。为支持5G移动网络的有效运行，需要中频频谱。该频谱的大部分目前被用于2G和3G，从而推动电信公司探索频谱重耕，为4G和5G业务释放频谱（例如1 800 MHz、2.1 GHz、2.3 GHz和2.6 GHz）。但在全球范围内，可用于移动业务的3 300-4 200 MHz和4 400 MHz频段的频谱正在增加，可以整合卫星业务以增强5G业务能力，解决在全国范围内提供多媒体业务、无处不在的覆盖、机器对机器通信和关键电信任务面临的一些主要挑战。

框2：华为 – 多层频谱方法

- 覆盖层 – 利用2 GHz以下的频谱（如700 MHz）提供广域和深度室内覆盖。
- 覆盖和容量层 – 依靠2-6 GHz范围内的频谱，提供容量和覆盖之间的最佳平衡。
- 超级数据层 – 依靠6 GHz以上的频谱和毫米波频段解决需要极高数据速率的具体用例。

来源：<https://www.huawei.com/en/public-policy/5g-spectrum>

通过载波聚合实现5G能源效率提升

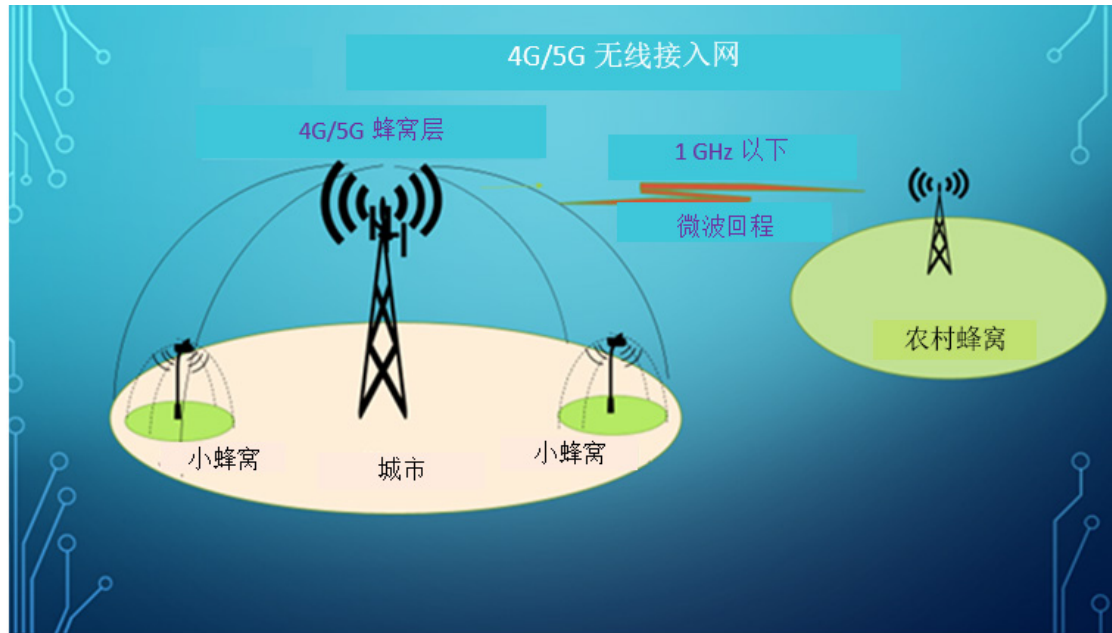
在3 300-4 200 MHz和4 400-5 000 MHz范围内，可用于IMT（国际移动通信）的频谱正在全球范围内增加。在几乎所有的国家，3 400-3 600 MHz频段都被划分给与其他业务共同作为主要业务的移动业务。

6 GHz以下频段对于支持广阔地理区域内的大多数5G使用场景至关重要。3 300-4 200和4 400-5 000 MHz频率范围适合提供广域覆盖和良好容量之间的最佳平衡。

¹³ McGuire等人，EURASIP无线通信和网络杂志，2012年，2012:112 <http://jwcn.eurasipjournals.com/content/2012/1/112>

动态频谱接入（DSA）使用数据库识别现有许可业务在任何时间和地点未使用的频谱，以便在不干扰现有业务的情况下将其提供给其他用户。DSA可以通过在可能的情况下提供未使用的5G频谱，为现有和新用户提供机会性频谱接入，同时优先考虑主要许可业务。DSA技术有时用于电视空白频谱UHF频段。

主要结论：政策制定机构可以考虑提供3 300-4 200 MHz和4 400-5 000 MHz范围内不同频段部分，以建立大块相连的频谱，同时也提供700/800 MHz频段的频谱，以确保农村地区的移动宽带传输。



3.5.6 低地球轨道卫星技术 – 服务不足的农村地区

新一代低地球轨道（LEO）卫星技术可能彻底改变将宽带延伸到服务不足的农村地区的方式。

通信卫星通常被放置在赤道上空约36 000公里的地球同步静止轨道上，在静止位置上24小时围绕地球运行。然而，这些卫星的设计、建造、测试、发射和部署都非常昂贵。此外，这些卫星发射的信号从地面往返一次需要半秒以上的时间。

低地球轨道范围内的卫星体积更小，轨道运行速度更快，功能更强大，发射和运营成本更低。这些卫星提供的互联网时延约为35毫秒，与许多为个人、小企业和农村社区服务的电缆和DSL系统相当。

几家公司正在开发并计划在2020-2030年期间发射低地球轨道卫星。SpaceX已经开始发射其新的星链卫星星座。星链项目包括大约12 000颗卫星，在大约1 000公里高度运行，覆盖半径约为1 000公里，因此需要一个庞大的卫星网络。

3.5.7 高空平台系统

高空平台台站（HAPS），充满氦气，在平流层约20公里的高度运行，它与卫星系统（包括非地球静止星座）有可能提供非常高的数据速率（100 Mbit/s至1 Gbit/s或更高），

为主要城市和郊区以外的固定或地面无线回程网络提供补充。HAPS和卫星系统可以把视频传输传送到农村和非常偏远的地区（如岛屿）的固定地面系统。它们可以集成到固定无线接入和移动解决方案等其他网络中，从而增强5G业务能力，以应对与多媒体流量增长、无处不在的覆盖、物联网、机器对机器通信和关键电信任务有关的主要挑战¹⁴。

1 GHz以下的频率更适合HAPS长距离、低带宽应用，在农村地区提供广泛的覆盖，特别是在发展中国家，包括非洲，以增强4G和5G覆盖。2023年世界无线电通信大会（WRC-23）探讨这一方法，考虑在已经确定用于IMT的2.7 GHz以下的某些频段中将高空平台台站作为移动业务IMT基站使用。

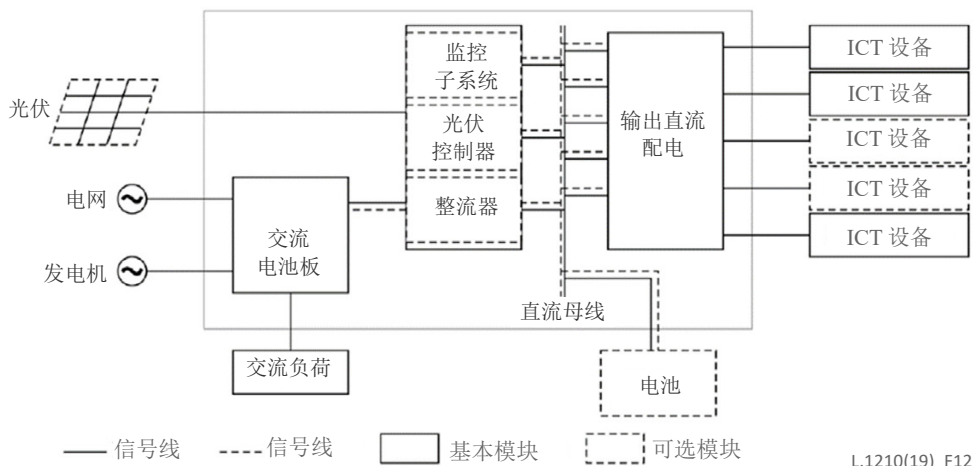
主要结论：政策制定机构可以考虑提供低频频谱（如700 MHz频段），确保农村地区的移动宽带接入。

可以预计，3.3-3.8 GHz频谱可以成为一系列初始5G业务的基础。

3.5.8 5G基站可再生能源解决方案

该解决方案涉及将电网、可再生能源和发电机等不同能源来源连接到基站的电源输入板。为了最大限度地利用可再生能源，该系统应用智能技术优先使用可再生能源，或者根据不同条件下的运行成本来选择电网、电池储能系统或发电机。下面是该系统基本结构的一个示例。

图9：5G基站多能源输入系统，包括可再生能源



当电网容量因5G基站日益增长的电力需求而出现不足时，来自太阳能光伏（PV）电池、风力涡轮机和燃料电池的可再生能源可能是增加可用电力容量的一个非常好的选择，以确保整个系统继续平稳、不间断地运行。这在关于5G网络可持续供电解决方案的ITU-T L.1210建议书有所描述。

¹⁴ 国际电联：高空平台系统，<https://www.itu.int/en/mediacentre/backgrounders/Pages/High-altitude-platform-systems.aspx>

4 缺乏电力接入

4.1 限制宽带扩展的能源挑战

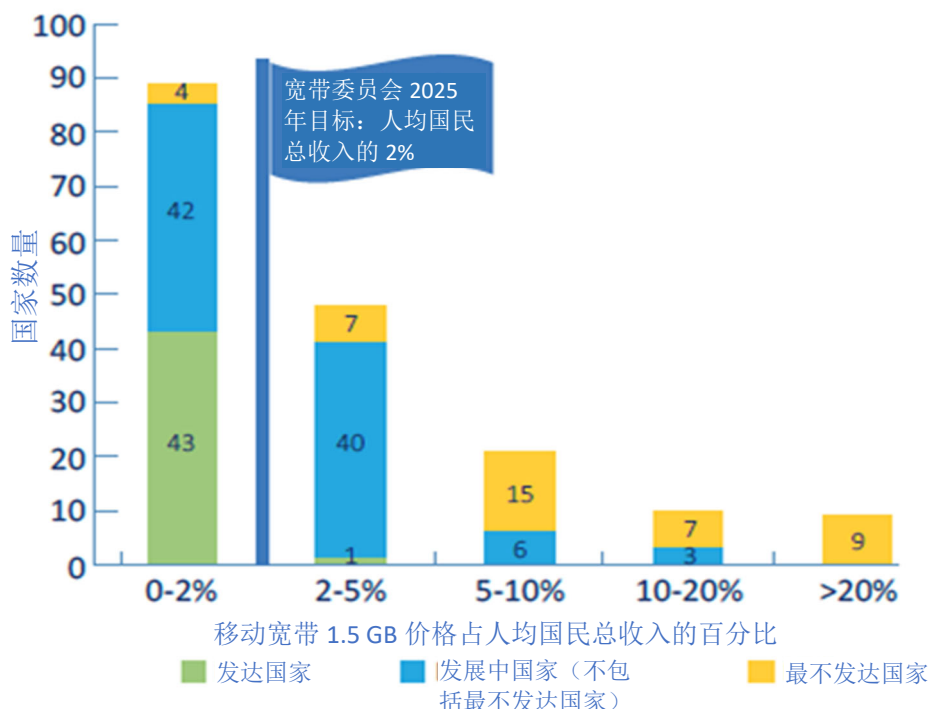
接入可靠和负担得起的电力是发展农村地区宽带接入基础设施的先决条件。没有电，就无法充分实现社会和经济效益，实现共同繁荣，改变农村社区低收入家庭的生活。

全球ICT生态系统消耗了大量能源，估计每年全球总发电量的约10%都被用于为数据中心云、互联网宽带基础设施、IT网络/软件和终端用户设备供电。如果无法获得负担得起的电网接入，农村地区宽带基础设施需要接入可靠的离网电源。

缺乏电网电力是电信运营商面临的一大挑战，他们必须自行提供电力解决方案，以扩展农村地区的蜂窝或固定无线宽带基础设施。

尽管近年来取得了相当大的进展，但如图10所示，在许多发展中国家，特别是最不发达国家，可负担性仍然是一个重大挑战。

图10：宽带在最不发达国家仍然昂贵



为了使发展中国家能够负担得起入门级宽带数据套餐（1.5 GB），宽带促进可持续发展委员会设定了一个目标，到2025年，将宽带价格降至不超过人均每月国民总收入（GNI）的2%。

农村地区缺乏电网基础设施，增加了建设宽带互联网网络以服务偏远社区的成本，这可能占建设和运营宽带基础设施（回程系统、移动基站系统或固定无线接入最后一英里连接）所需投资的很大一部分。

独立的柴油电力解决方案，如果作为农村地区的主要能源，需要高昂的资本和运营成本。运营商的投资回报率很低，因为在农村以及经常是在偏远地区，柴油发电机的维护、安全和燃料成本都很高。

因此，农村地区的创新能源解决方案需要包括采取以下措施：为农村电信网络基础设施有源元件以及为终端用户、社区服务和当地商业客户接入终端设备（如CPE、设备、计算机、电话、智能电视）提高电力供应的可用性和可靠性。

在没有电的农村社区，当地人不得不前往最近的电池充电点（可能位于几英里之外），为手持设备或其他电池供电的ICT设备充电。这导致了额外的费用和服务中断，进一步降低了农村贫困人口对互联网服务和ICT应用的需求。一般来说，如果没有电力供应，除了手持式设备外，ICT设备和设施不会被部署到农村和偏远岛屿地区。在特定情况下，可以用电池提供临时应急电源。

上述第一个障碍可以被描述为“宽带供应缺口”，即在人们生活和工作的地区缺乏宽带业务。第二个障碍，即“宽带需求缺口”，可以理解为全国人口中可能有机会使用宽带，但没有获得该业务的人口比例。

在人口密度明显低于城市和城郊地区的农村和偏远地区，宽带供应缺口尤为突出。在发展中国家的农村地区和岛屿社区推广宽带业务面临的主要挑战包括：

- 地理和地形偏远且具有挑战性；
- 缺乏可靠、负担得起和安全的基础设施，特别是电网和道路；
- 缺乏移动互联网覆盖或固定宽带无线接入网络，无法使用国际带宽；
- 缺乏ICT设施；
- 移动设备和互联网ICT设备的充电地点有限且距离遥远；
- 有限的离网电力解决方案 – 不规律的柴油发电机供应以及间歇性可再生能源。

近年来，移动网络和固定无线宽带业务运营商由于服务质量恶化和未达到可用性目标，未能实现与监管机构商定的绩效目标而受到处罚。不幸的是，网络故障和停机事件最常见的原因之一是缺乏可靠的电力供应；即使作为备用电源（更不用说主要电源），柴油发电机组也不能很好地替代国家电网接入。

4.2 人人享有可持续能源

随着可再生能源技术开始取代化石燃料，以及传统电力和宽带行业 – 此前由主体运营商主导 – 被更加分散的创新商业模式所颠覆，电力市场目前正在经历转型。

实现人人享有可持续能源是SDG之一。作为实现这一目标的战略之一，宽带促进可持续发展委员会制定了一系列目标，到2030年，旨在实现：

- 确保普遍获得负担得起的、可靠的现代能源服务；
- 在全球能源结构中切实提高可再生能源的比例；
- 将能源效率的总体改进比率提高一倍；
- 加强国际合作，促进获取清洁能源研究和技术，包括可再生能源、能源效率和先进的清洁化石燃料技术，并促进对能源基础设施和清洁能源技术的投资；
- 按照各自的支持计划，扩大基础设施并提升技术水平，为发展中国家，特别是最不发达国家、小岛屿发展中国家和内陆发展中国家的所有人提供可持续的现代能源服务。

SDG目标7还呼吁成员国“确保人人获得负担得起的、可靠和可持续的现代能源”。

太阳能和风能等可再生能源技术的成本迅速下降，再加上增效措施和创新的能源服务提供机制，应该能够加快实现普及电力接入目标的战略举措。

基础设施占了电力接入成本的很大一部分。城市人口通常通过国家电网获得电力。然而，在发展中国家，通过广泛的输电和配电基础设施向农村和偏远地区输送电力需要大量投资，这令许多现有的电力公司望而却步，而且产生的回报非常低。离网发电利用迷你电网和微电网结构，结合当地可用的低成本、更清洁的可再生能源，可以为农村和偏远地区设施提供可靠和负担得起的电力¹⁵。

4.3 发展中国家农村电力短缺

电力接入不可靠和不公平是扩大农村地区经济活动和宽带基础设施面临的主要障碍之一。这是私人投资面临的主要障碍¹⁶。

2017年，14%的世界人口（约10亿人）仍然无法获得电力。除撒哈拉以南非洲以外，这一数字已大幅下降（见图11）。亚洲和非洲无电人口占全球的95%，其中84%生活在农村地区（见图12）。

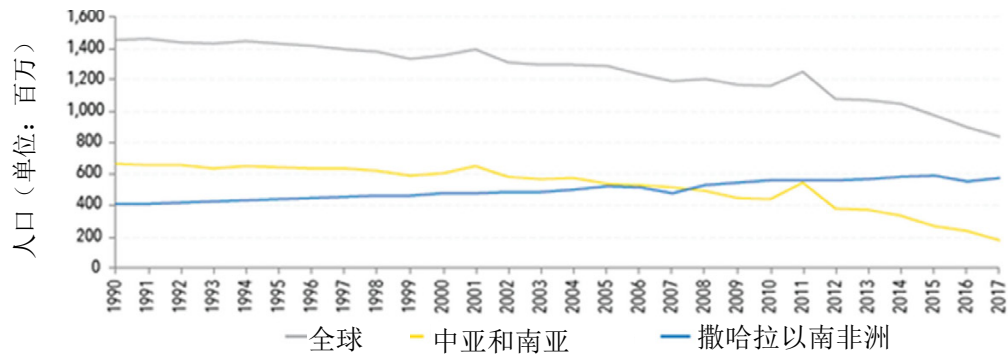
2018年，全球发电量增长了4%，其中可再生能源的贡献为45%。2017年，在全球层面，农村地区电力接入率为79%，远远落后于城市97%的接入率。得不到充分服务的农村人口占全球电力接入缺口的87%。如图11所示。2017年，全球无电农村人口中有66%生活在撒哈拉以南非洲。

¹⁵ 联合国贸发会议（UNCTAD） - 《2017年最不发达国家报告 - 变革性能源获取》 <https://unctad.org/en/pages/PublicationWebflyer.aspx?publicationid=1902>

¹⁶ 《非洲开发银行、国际货币基金组织和世行集团的联合报告：20国集团与非洲的契约》，二十国集团财长和央行行长会议，2017年3月17-18日，德国巴登-巴登

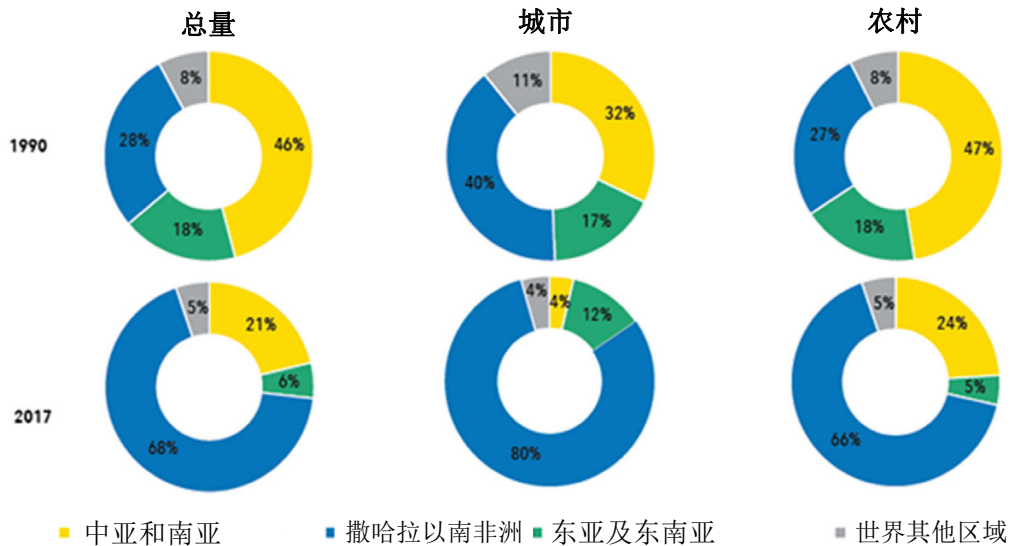
图11：无电农村人口

1990-2017年电力接入缺口的演变情况（单位：百万）



来源：世界银行

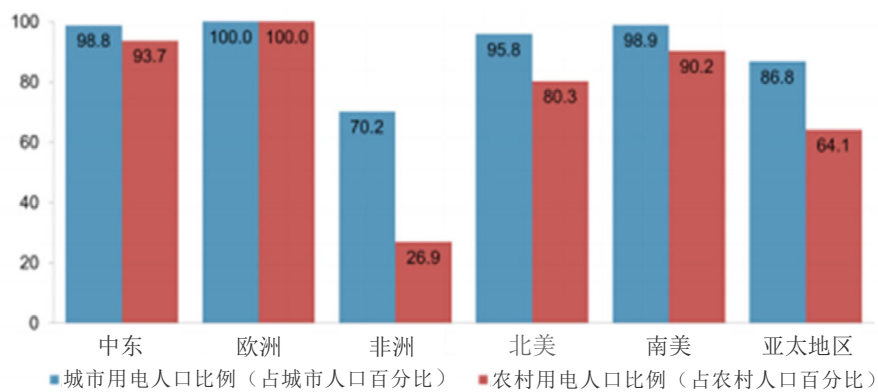
按照总量、城市和农村划分，1990年和2017年全球电力接入缺口各区域占比



来源：世界银行

注：基于无电人口

图12：用电人口比例（城市和农村）



来源：世界银行(2017)

没有负担得起的能源，就难以促进经济增长，克服贫困，提供高质量的教育，促进当地商业和工业，扩大就业机会，支持人类健康和发展。

基础设施不足，特别是电力供应不足，限制了宽带业务的部署和可负担性，从而加剧了不平等。

技术发展以及可再生能源和数字技术成本的下降，为从依赖化石燃料的高碳世界过渡到可持续的低碳经济创造了机会。全球政策研究表明，到2040年，风能和太阳能光伏发电将提供超过一半的新增发电量。

4.4 向可再生能源基础设施过渡

鉴于非洲和亚洲发展中地区的大多数农村人口无法接入电网，以电网为基础的传统电力分配模式 – 依靠现有的电力供应商将其国家输电配电网长距离延伸到农村地区 – 已经失败。

可再生能源使社区能够实现从化石燃料到负担得起的清洁能源的跨越，从而为全球减少温室气体排放保护环境的努力做出贡献。由于技术创新，扩大负担得起的电力接入的最可靠模式取决于脱碳化、数字化和分散化的电力解决方案。

过去十年间，可再生能源的成本大幅下降。国际可再生能源机构（IRENA）2019年开展的一项研究认为，可再生太阳能和风能的价格已经下降到与煤炭和其他化石燃料相当甚至更低的水平。宽带业务提供商可以通过从更便宜、清洁、可再生的来源生产自身所需的清洁能源，或通过社区能源发展项目合作，克服投资农村宽带基础设施的能源挑战和障碍。围绕着提供储能解决方案，也正在形成一个产业，这是促进可再生能源普及的关键。此外，IT创新也在优化电力生产和消费方面发挥着关键作用。

4.5 提高能效 – 优化能耗

“节能电器将有助于降低激励电力接入计划所需的能源投资成本。通过把离网电器负荷的功率降低一瓦特，就能降低太阳能系统的初始成本，改善服务，或两者兼而有之。”（Van Buskirk，2015年）。同样，提高能效可以让更大型的离网太阳能发电设施变得更易于负担。

Van Buskirk在2015年所做的分析表明：“如果使用超级高效的设备和适合规模的太阳能光伏和电池，典型的离网能源系统前期成本可以降低高达50%，同时提供相当或更多的能源服务。”通过重新设计基站无线电设备（数字信号处理模块、收发器功率放大器、无线电频率和连接线），可以提高效率。收发基站（BTS）系统和数字信号处理器的功耗优化是通过使用ASIC、FPGA或DSP等集成电路架构实现的，所有这一切组合在一起就可以获得更好的效率。¹⁷

可以通过以下方式进一步优化功耗：

¹⁷ S. Zoican, “可编程数字信号处理器（DSP）在3G移动通信系统中的作用”，《Acta Technica Napocensis》第49卷，第49-56页，2008年。

- 在特定时间关闭系统以匹配负荷¹⁸
- 动态管理网络资源
- 在不同运营商之间共享移动基站、无线收发器和中继站资源。

另外，扩大工作温度范围将消除或减少空调电力需求。这将大幅降低远程站点的能源需求和成本。

¹⁸ L. M. Correia、D. Zeller、O. Blume等人。“能源感知移动无线电网络的挑战和促成技术”，IEEE通信杂志，第48卷，第11期，地66-72页，2010年。在[出版商网站](#) | [谷歌学者](#)中查看。

5 农村电气化可再生能源来源

可再生能源解决方案在当今世界各个区域都是成本最低的新增电力来源。过去的十年间，太阳能光伏、风能、水电、地热和生物质能的发电成本大幅下降，降至了化石燃料发电的成本范围内。¹⁹

5.1 可再生能源比化石燃料更具竞争力

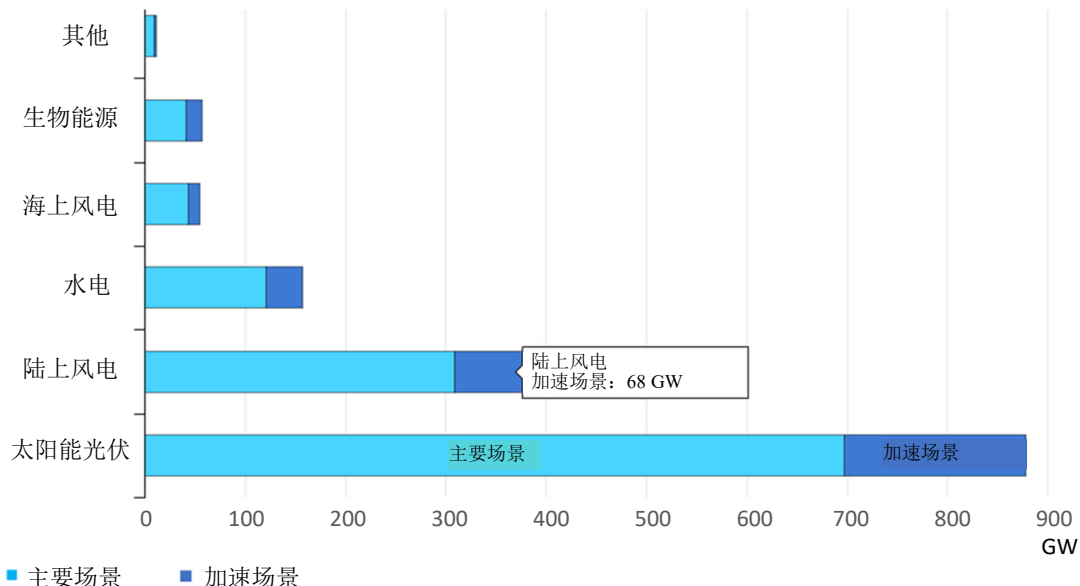
最近大型太阳能光伏项目的发电成本已经低于化石燃料发电厂的电价（IRENA，2018年）。陆上风电和聚光太阳能发电的成本下降，也导致其他可再生能源与通过煤炭或其他化石燃料发电相比，竞争力增强。

可再生能源解决方案可用于各种配置，从并网到离网网络和独立的家庭解决方案。

在无法接入电网的农村地区，离网能源网络将成为为宽带基础设施组件供电和为农村经济提供电力的首选网络，具有可扩展性、灵活性和模块化的优势。

根据国际能源署（IEA）预测，从2019年到2024年，可再生能源发电量将增加50%（增加1 200吉瓦）（见图13和14）。

图13：2019年至2024年可再生能源发电量增长情况（单位：GW）



来源：IEA，按技术划分，2019年至2024年可再生能源发电量增长情况。

可再生能源已经成为首选技术。到2040年，可再生能源将占全球新增容量的66%（三分之二），在总发电量中的比例将上升到40%以上（见图14）。

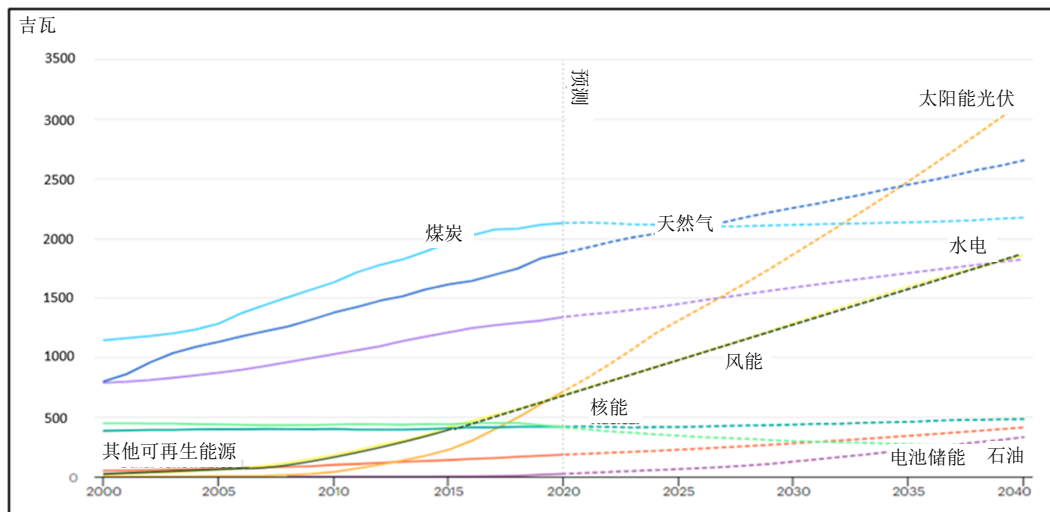
¹⁹ IRENA，2018年可再生能源发电成本。<https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018>

不与主电网连接的迷你电网和微电网可再生能源解决方案必须采用混合配置，将太阳能或风能系统与储能解决方案相结合，以处理此类多种能源的可变性和间歇性。这使得确保迷你电网或微电网上分配的电力具有高可用性和可靠性成为可能。

在适用的情况下，混合迷你电网可以使用可再生能源与备用柴油发电机相结合，这对已经拥有传统发电机园区的运营商来说是一个有吸引力的选择。可以优化这些解决方案，以尽量减少柴油发电机的使用时间和频率，显著节省燃料消耗、维护和OPEX。

储能解决方案的重大进展对能源供应的可靠性产生了积极影响，并导致农村地区更多地使用可再生能源解决方案。在太阳能光伏系统中，储能解决方案主要用于供应晚间高峰，并调节和平滑微电网输送的电力。在微电网接到主电网时，多余的电力可以出售给电网运营商，有助于减少二氧化碳的排放。

图14：按来源划分，2000年至2040年装机和预计发电量



(按来源划分，2000-2040年新政策场景下装机发电量)

来源：IEA《2019年世界能源展望》，<https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2019>

近年来，在能源获取方面取得了巨大的进展。2017年，全球电气化率达到89%。然而，这一发展在很大程度上绕过了最不发达国家，特别是撒哈拉以南非洲，那里生活着5.8亿人，主要在农村地区，仍然无法获得电力。

根据IEA的预测，到2040年，风能和太阳能光伏的合计发电量将超过所有能源组合的38%，而2018年该比例约为18%。这为拥有世界上最丰富的太阳辐射资源的非洲和亚洲农村地区带来了重大机遇，可以部署太阳能光伏解决方案，作为最廉价的电力来源。

可再生能源电力的成本大幅下降77%，不到0.03美元/千瓦时，使得可再生能源发电与化石燃料能源替代品相比更具竞争力（见图15）²⁰。

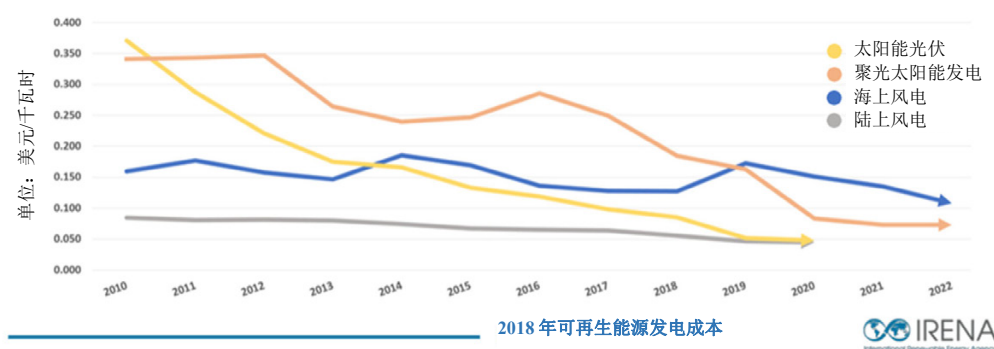
²⁰ IRENA（2019年）- 太阳能光伏的未来，<https://www.irena.org/publications/2019/Nov/Future-of-Solar-Photovoltaic>

可再生能源的竞争力为私营公司和能源公司提供了巨大的机会，使其能够采用新的商业模式，实施创新的可再生能源解决方案，缩小农村和城市的电力差距，最大限度地减少化石燃料的使用，从而减少温室气体排放。

“以具有成本竞争力的可再生能源为基础的电气化是能源转型的支柱，也是支持实现《巴黎协定》中设定的气候目标的关键低成本脱碳解决方案。”（IRENA，2019年）²¹

可再生能源的进步和数字技术的创新，在国家对能源获取议程的坚定政治承诺的支持下，结合融资和地方创业，可以大大加快农村电力接入的扩展。

图15：2018年可再生能源发电成本



来源：<https://www.irena.org/newsroom/pressreleases/2019/May/Falling-Renewable-Power-Costs-Open-Door-to-Greater-Climate-Ambition>

在大多数无电人口生活的农村地区，电气化率一直在快速增长，根据世界银行集团的数据估计，2018年农村地区的电气化率约为76%。²²

5.2 太阳能

太阳能是最普遍的清洁能源，也是最适合农村电信设施的分布式电源，这是因为该技术的模块化特性：它可以很容易地进行扩展以满足电力需求。

加速部署可再生能源解决方案，特别是太阳能技术，将大大减少二氧化碳排放。未来十年，太阳能光伏电池的装机容量预计将增加近六倍，到2030年，价格预计将下降至约0.08美元/千瓦时（装机成本）²³。在健全的政策支持下，太阳能领域的技术进步、太阳能的竞争力以及对农村电气化项目的定向投资，将为城市和农村社区带来可观的社会经济效益。

²¹ 可再生能源成本不断下降为更大的气候雄心敞开了大门<https://www.irena.org/newsroom/pressreleases/2019/May/Falling-Renewable-Power-Costs-Open-Door-to-Greater-Climate-Ambition>

²² IRENA，扩大电力接入的离网可再生能源解决方案：https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jan/IRENA_Off-grid_RE_Access_2019.pdf

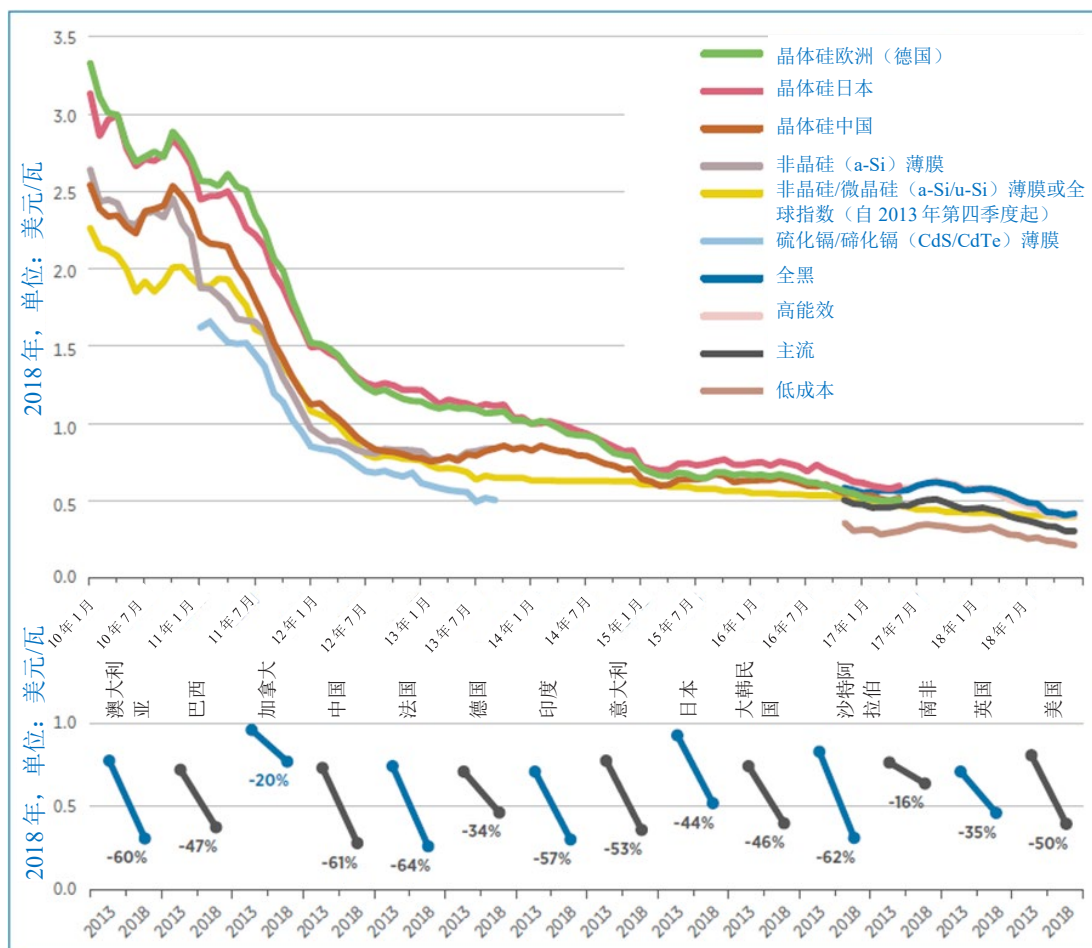
²³ IRENA，2019年，- 太阳能光伏的未来，https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Nov/IRENA_Future_of_Solar_PV_2019.pdf

2016年，太阳能光伏发电的增长速度超过了其他能源，这主要是因为太阳能光伏发电在中国的成功部署。数量的增长以及规模经济的改善导致了成本大幅下降。2016年，可再生能源占净新增电力容量的近三分之二，有近165吉瓦（GW）并网（见图14）。公用事业规模的太阳能光伏发电成本持续大幅下降，在2010年至2018年大幅下降了77%以上（IRENA于2019年发布的全球加权平均 – “平准化电力成本”）。世界所有区域都出现了太阳能价格大幅下降的情况（见图16和17）。

在发展中国家，特别是在非洲和亚洲，IEA预测，在私营部门投资和其他融资方案的支持下，离网太阳能光伏发电方案将增长两倍，达到3 000兆瓦。然而，影响太阳能电池部署的最重要的技术限制来自物理空间要求，这与太阳能电池板的效率成反比。太阳能电池板的效率越高，需要的空间就越少。

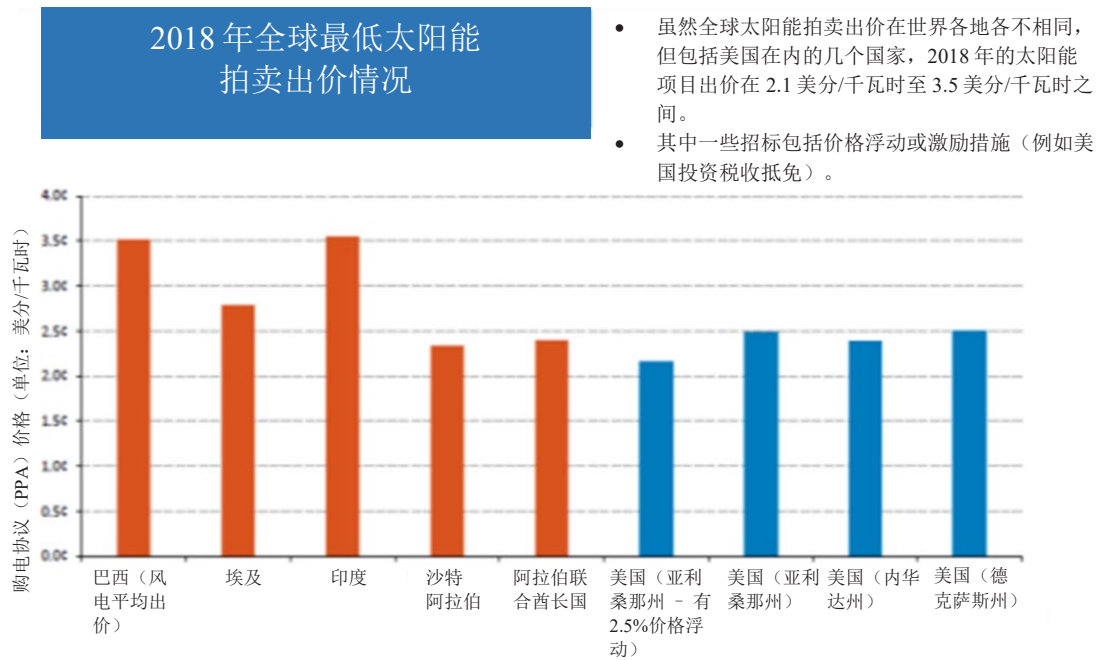
图16: 太阳能光伏能源价格下降情况

按类型和市场划分，2013年至2018年模块平均价格



来源：基于GlobalData，2018年；IRENA可再生能源成本数据库，2019年；Photon Consulting，2018年；以及pvXchange，2019年。

图17：2018年太阳能拍卖最低出价



注：PPA = 购电协议

来源：欧洲太阳能协会（Solar Power Europe）– “2019-2023年全球太阳能电力市场展望”

5.2.1 太阳能技术概述

光伏模块是太阳能系统阵列的基本构件，由若干个电连接的小型光伏电池组成。它使用一种基于半导体的技术，将太阳光转化为直流电（DC）。光伏模块设计的电力输出范围从几瓦到100瓦。

晶体硅（c-Si）电池板是第一代太阳能光伏板，但仍占据全球光伏生产市场95%的份额（Fraunhofer ISE，2019年），这种规模经济让这种技术比其他技术更易于负担。晶体太阳能电池板的效率很高，多晶体太阳能电池板的效率高达17%，单晶太阳能电池板的效率高达18%。预计在未来几年内，成本、材料纯度和产出将进一步提高（GlobalData，2019年）。

第二代“薄膜”太阳能光伏技术生产成本更低，但效率水平普遍较低。其他有前途的设备还在研发中，例如效率高达24.4%的钙钛矿电池，但是还没有上市。

一种新的电池技术是基于使用钝化发射极和背面电池（PERC）。这些电池具有先进的硅电池结构，在结构上与传统的单晶硅光伏电池相似。由于生产工具的可靠性、性能和产量的提高，PERC正在成为单晶电池的新行业标准。

因此，选择适合特定设施的太阳能光伏技术是由电池板投资成本、模块效率、空间可用性和当地因素之间的权衡决定的。

5.2.2 太阳能阵列布置

固定阵列的设计是为了确保安装的太阳能电池组件朝向太阳光线（赤道方向），以提供最佳的年电力输出曲线。另一种方法是使用可以跟踪太阳的设计，如双轴跟踪器系统；但是，这些系统的成本要高得多。最佳的倾斜度，以最大限度地提高直接辐射的强度，将取决于当地的气候和地形特征，而且必须考虑安装成本。

光伏模块的性能受到温度条件的影响。当与采用最大功率点追踪的现代充电控制器相结合时，太阳能电池板的性能在寒冷的天气下会得到改善，而传统的充电控制器设计，将电流从太阳能电池直接传输到电池，而不考虑由于环境条件引起的太阳能电池性能的变化²⁴。配备了最大功率点追踪的充电控制器可以优化电流传输，从而显著提高整体性能。

太阳能光伏模块可以安装在地面、建筑/屋顶或杆/塔上，采用固定倾角或单/双轴太阳跟踪系统。

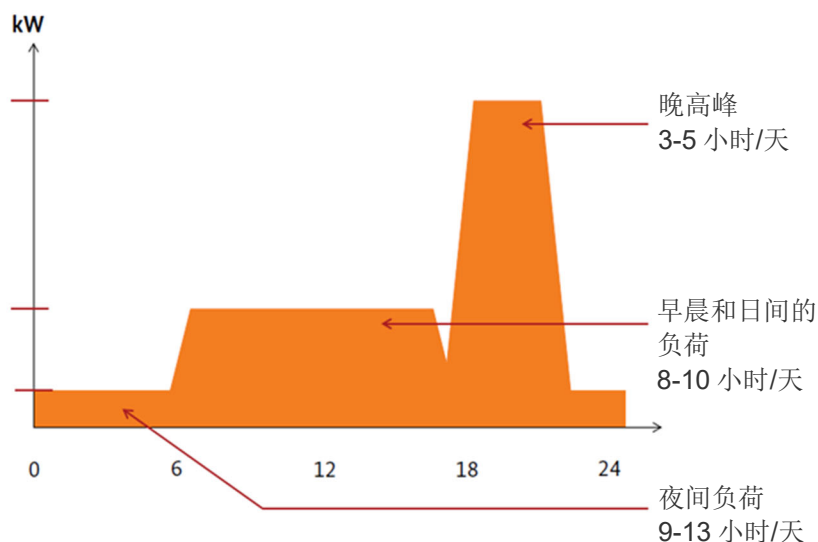
5.3 确定太阳能光伏阵列规模的考虑因素

计算离网系统需求的第一阶段是在对该位置进行全面调查并估计需求后，预测需求，这必须考虑到预期的未来增长。

生成典型的负荷曲线，给出24小时内的每小时平均负荷需求，以及一年内最坏情况规划期，这可能由热带地区的云量和降雨量决定，或由温带地区的降雪量决定。

图18中展示了一个负荷曲线示例。

图18：农村地区典型日负荷曲线



来源：农村地区典型日负荷曲线（IEA，2013年）

²⁴ 关于MPPT的技术讨论 – 请参见《家庭电力杂志》第72期，1999年9月，<http://www.homepower.com>。

计算出每小时的负荷需求后，要计算以千瓦为单位的峰值负荷。必须包括为备用电池充电所需的能量，以及预测的电力需求。评估总峰值需求，需要考虑了“降额因数”，即所有子系统的损耗或低效。这些系统组件包括：

太阳能充电控制器 – 调节从光伏板流向电池的电压和电流。它可以防止电池过充，延长电池寿命。

逆变器 – 将光伏板的直流输出转换为清洁的交流电，用于交流母线或供给交流电器。

电池或储能装置 – 储存能量，然后在需要时提供给电器。

负荷 – 连接到太阳能光伏系统的所有电器的组合，如照明、无线电、电视、电脑、冰箱等。

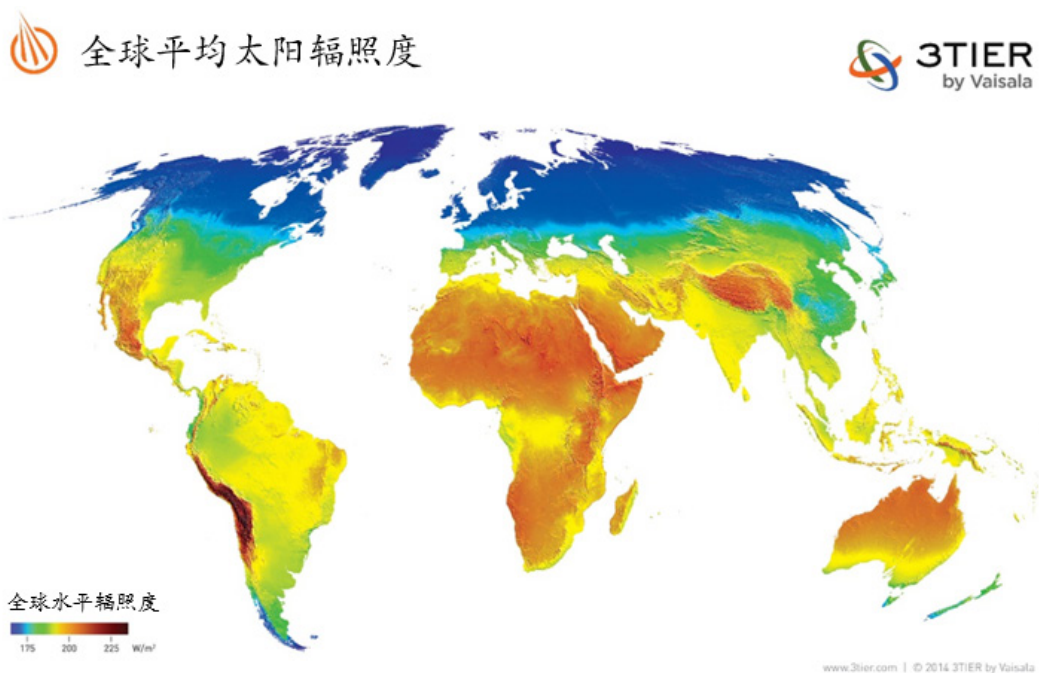
辅助能源 – 可以是柴油发电机或其他可再生能源。

辐照度数据

从地图（见图19）或其他精确测量和评估的数据来源获得有关地区的适当气候数据，提供日均太阳辐照度值。

图19：全球平均太阳辐照度

图19：全球平均太阳辐照度



https://www.researchgate.net/figure/Global-mean-solar-irradiance-10_fig3_275922125

5.3.1 太阳能逆变器 – 电压转换器

将几块太阳能光伏板串联起来，形成一个阵列。然后，将该阵列连接到一个集中型逆变器，将该阵列产生的直流电转换成交流电。直流输出的额定电压约为300至600伏，转换成当地适用的交流电压（欧洲的标准电压为220-240伏交流电，50 Hz，而北美为120伏交流电，60 Hz）。

5.3.2 太阳能相对于柴油发电机的优势

尽管太阳能系统的前期成本明显高于柴油发电机组，但从长远来看，太阳能发电是一个更便宜的选择，因为柴油发电机需要定期添加燃料和维护。

对于远离国家电网的农村电信设施，传统的方法是提供独立的发电机供电。太阳能发电是一个可行的替代方案。

对于农村电信应用来说，太阳能设施的运行成本非常低，保修期超过15年，但制造商通常提供20至25年的终身保修，预计在保修期结束时，输出功率将逐渐降至最初功率的80%左右。

5.4 风力发电

小型风力涡轮机（SWT）的发电量不到100千瓦，可以作为农村电气化和电信设施供电的绝佳解决方案。涡轮机的直径通常在7到15米之间，输出功率一般低于50千瓦。

典型的风力涡轮机可以在每秒3到5米的风速下发电，在大约15米/秒时达到最大功率，一般在大约25米/秒时切断（取决于设计）。

风力涡轮机的设计和要素

水平轴是风力涡轮机最常见的设计，与垂直轴设计相比，具有更高的效率和可靠性。

- 叶片设计 – 集成1到3个叶片安装在桅杆上。
- 对于非常小型的设施，例如一个家庭，风力涡轮机的直径将小于2米，输出功率约为1千瓦。
- 5米/秒或更高的平均风速可以支持转子表面每平方米产生约300千瓦时的年发电量。
- 一个20米的双转子扫掠区域可产生约6 000千瓦时的电量，在6米/秒的风速下增加到8 500千瓦时。
- 叶片必须安装在距离地面湍流15米以上的高度。
- 风力涡轮发电机可定速也可变速。
- 向上倾斜的电杆、桅杆或塔架在发展中国家非常流行，因为它们易于安装，便于维护和修理。

- 大多数SWT有一个永磁发电机（不需要齿轮箱）。

发电机产生交流电（AC），通过桥式整流器整流为直流电，产生类似于光伏系统的输出。

电池内充电系统的充电控制器可以防止过充，保护电池并防止涡轮机超速。

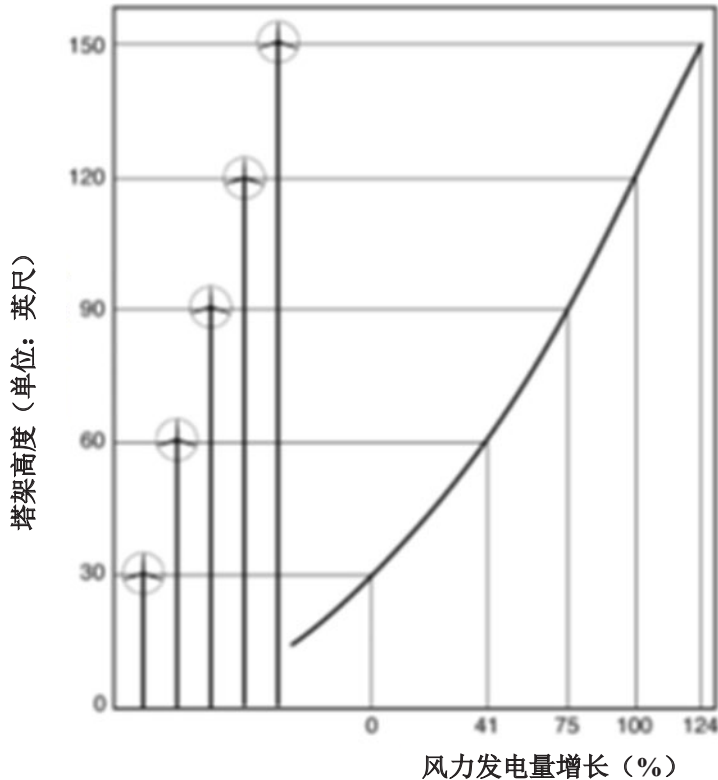
在无法获得当地数据的情况下，需要在安装前的较长时间内进行广泛的风力测量，因为涡轮机的具体位置非常重要，必须仔细研究以避免风力干扰。

风力发电有以下劣势：

- 输出不稳定，高度依赖当地地形和地理。
- 所有候选地点很少有可靠的风速数据，因此需要特殊工具来确定一个区域的最佳位置。
- 对塔架设计的结构要求较高，与传统的电信铁塔架相比，成本较高，因为传统电信铁塔架不需要承载与风力涡轮机相同的高负荷。
- 要求的功率输出越高，为满足结构需求，塔架的设计就越高、越复杂。

图20展示了功率输出随风塔高度变化的情况。

图20：风力涡轮机输出功率与塔架高度的关系



注：指示性数字，说明塔架高度对风力涡轮机输出功率的影响。

5.5 燃料电池

最近，燃料电池技术的发展在燃料类型和发电技术方面取得了相当大的进步。

使用氢作为燃料的燃料电池最受欢迎。氢是最清洁的燃料，因为它具有100%氧化特性，不排放任何污染物（只产生水）。然而，燃料电池的采用受阻于高昂的初始资本支出、燃料替换成本高和缺乏支持燃料供应链生态系统的基础设施。

5.6 生物质

生物质是一种引人注目的绿色技术替代形式，是小规模分布式能源发电的理想选择。在发展中国家的农村地区可以广泛获得燃料，这种技术已被越来越多地用于社区迷你电网发电应用。

然而，在电信应用中，生物质在可扩展性、操作复杂性、供应链可靠性和可持续性方面面临重大挑战。木屑、农业废弃物等生物质资源可用性的任何波动，都会影响将影响发电厂的生存能力和长期可持续性。

5.7 微水电（Micro-hydropower）

水力发电系统的发电原理与风力涡轮机相同。水流的力量推动与发电机相连的螺旋桨或水轮转动，就产生了电流。

- 微水电系统产生的功率小于100千瓦（kW）。
- 微型水电（Pico-hydro）系统产生的功率小于1千瓦。

微水电系统的资本成本受场地选择和基本布局的影响。

系统配置是根据可用的水头来设计的。

大多数微水电装置是径流式的。

- 没有任何大型水库；
- 只有在河里有足够的水流动时才发电；
- 当水位低或流量不足时，停止发电；
- 环境影响最小；
- 当水体有足够的水头和流量时，微水电可能是成本最低的电力来源；
- 服务于社区迷你电网和个人设施。

微水电系统的其他优势包括：

- 几十年安全可靠的投资；

- 个人、合作或社区所有权的可能性；
- 只需要半熟练工人和合作管理维护建设；
- 如果当地材料和技能可用，可以快速部署；
- 适应负荷快速变化的灵活性；
- 寿命长（几十年）。

微水电系统可用于有河流或瀑布的地方，也可用于不容易支持太阳能或风能系统的农村地区。它们维护起来相当简单，部署成本也比太阳能或风能系统低。微水电系统是为农村电信系统供电的一个有吸引力的选择。

微水电系统的安装和维护

微水电系统在技术上并不复杂，可以由当地社区实施和管理。

- 与可比的风力或光伏系统相比，需要更频繁的维护；
- 发电机的轴承和电刷需要定期维护和更换；
- 必须保护涡轮机免受碎片的影响；
- 电力一直在产生，因此电池不断充电，所以适合使用浅循环电池，如汽车电池，没有过度的性能限制。深循环电池提供类似的系统性能。根据水情和涡轮机的情况，确定进水管的长度和直径，否则会导致低效安装。

主要挑战：

- 电信铁塔站址附近是否有合适的水体；
- 一年中不同时期的供应（水流、水头）存在不确定性。

建议：与其提供自己的小型水力发电方案，宽带业务提供商可以考虑采用基于从水电供应商处采购电力的服务模式，采用商定的商业模式，如购电协议（PPA）或固定费用。

5.8 可再生能源的比较 – 总结

表3中概述了各种适合农村和偏远地区离网设施的可再生能源的主要利弊。这些能源产生的能量将主要服务于宽带系统及其辅助支持服务，但也可以进行增强用于为附近社区提供电气化服务。

表3：可再生能源的优势

	利	弊
太阳能	<p>可再生和可持续的太阳能资源无处不在。</p> <p>由于其模块化技术，可广泛扩展 – 商业化规模或非常小规模的应用。</p> <p>适合分布式发电。</p> <p>除了偶尔需要一些非熟练的劳动力来清洁电池板外，太阳能电池板没有维护成本。</p> <p>与其他绿色技术方案相比，具有成本竞争力。电价稳定。</p> <p>寿命20至25年，无排放运行。</p>	<p>对较高容量部署的空间要求较大。</p> <p>间歇性，因为依赖于太阳，但可以预测。</p> <p>与基于柴油的传统解决方案相比，前期资本支出较高。</p> <p>电池板被盗和被故意破坏，导致投资的高风险（围栏）。</p> <p>与化石燃料相比，功率密度低。</p> <p>投资回报时间长。</p>
风能	<p>适合小规模分布式发电。</p> <p>与太阳能相比，所需空间明显减少。</p> <p>维护成本低。</p> <p>与化石燃料相比具有成本竞争力，但不如太阳能。</p> <p>电价比化石燃料选项更稳定。</p>	<p>可靠性低 – 由于风速不断变化、不可预测性和间歇性。</p> <p>高昂的前期成本。10到20年后收支平衡。</p> <p>低扩展性，高投入。</p> <p>需要20-40米高的高塔，以实现最佳发电效果。</p> <p>风力设备的可靠性差异很大。</p> <p>运行时噪音大。</p> <p>定期维护成本高。</p> <p>会对飞鸟造成危害。</p>
微水电	<p>当水资源可用且流量稳定时，特别是在雨季或冬季（如果没有冻结），效率高且可靠。</p> <p>低流速或低落差（或水头）高度足以产生电力。</p> <p>小规模系统的资本成本低。</p> <p>随着河流系统径流运行 – 无需大坝。</p> <p>维护成本低。</p> <p>适合发展中国家生产的多样性。</p>	<p>站点位置和合适溪流/河流可能远离所服务的社区。</p> <p>不易扩展，溪流/河流的大小和流量可能给扩展造成限制。</p> <p>旱季和夏季功率较低。</p> <p>土木结构和河流改道可能会带来问题。</p>
燃料电池	<p>技术可靠。</p> <p>系统紧凑，所需空间更小。</p> <p>适合屋顶和城市环境。</p> <p>低维护。</p> <p>低排放和低噪音。</p> <p>不易被盗和破坏。</p>	<p>高额的前期投资和技术成本使其成为成本效益较低的绿色选择。</p> <p>高度依赖燃料供应生态系统和物流。需要建立燃料重整厂和可靠的供应链。</p> <p>分布式发电的电量范围小。</p>

表3：可再生能源的优势（续）

	利	弊
生物质能	生物质能潜力巨大。 广泛的工厂能力。 通过强大的供应链整合，可以实现高可靠性。 技术广泛可用。	操作复杂。 资源和运营成本高。 生物质原料供应挑战和依赖于不可靠供应链生态系统。 由于原料价格波动，对投入成本敏感。

来源：改编自GSMA，《移动网络绿色能源》（Green Power for Mobile）

5.9 离网可再生能源

将宽带接入扩大到农村地区的方案需要大量投资，如果没有补贴或其他形式的财政支持，潜在的收入不足以覆盖成本。

将传统电网基础设施的电力供应扩展到人口稀少的农村地区不具备经济性，因为将高压输电线路和配电网延伸到偏远地区需要高昂的投资成本。

IRENA²⁵称，离网可再生能源解决方案，包括独立系统、微电网和迷你电网，作为可行的电气化解决方案，已成为扩大服务不及或服务不足社区电力接入的具有成本竞争力的主流选择。离网系统独立于国家电网运行，由私营公司运营，有时与当地社区团体合作或与主导的国家运营商合作。

图21说明了电网和迷你电网的细分，表明迷你电网是最适合人口稀少的农村电气化解决方案。在这一细分领域，与电网延伸相比，迷你电网提供了最低的成本、无补贴的电力零售价格。

虽然发展中国家的国家电网在为城市地区提供服务方面取得了不同程度的成功，但最不发达国家农村地区的绝大多数客户，仍然受到电量和覆盖问题的困扰。

部署离网解决方案是为了在没有接入国家电网的服务不及社区发电，或者在电网供应不可靠或负担不起电网的服务不足地区发电。离网电力网络支持家庭电气化，但大部分容量专门用于商业用途（如为电信基础设施供电）、工业终端用途（如热电联产）、公共服务（如街道照明、教育、医疗保健中心、抽水）和生计（如渔业、农业）。

这些系统的区域性部署应以当地的经济、地理和社会因素为基础。²⁶

离网解决方案可适应当地条件、可扩展、具有环境可持续性，可赋能农村社区，支持教育、医疗保健等领域的数字公共服务。

²⁵ 离网可再生能源解决方案扩大电力接入：https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jan/IRENA_Off-grid_RE_Access_2019.pdf

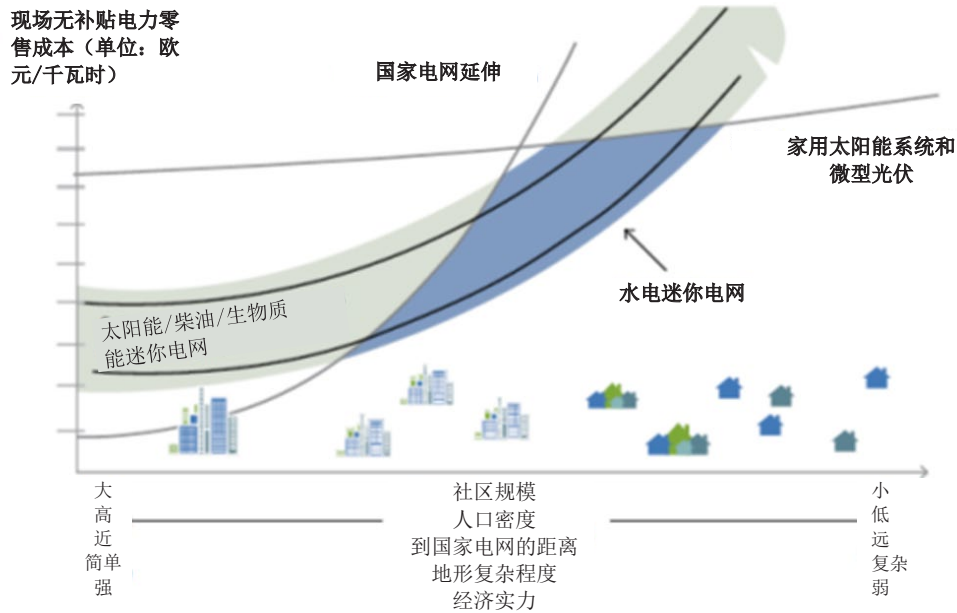
²⁶ https://www.ren21.net/Portals/0/documents/Resources/MGT/MinigridPolicyToolkit_Sep2014_EN.pdf

IEA估计²⁷，到2030年为所有人提供电力，每年需要520亿美元的投资。详细的地理空间建模表明，以自主迷你电网中的太阳能光伏为主导的分散式系统，是撒哈拉以南非洲四分之三新增连接所需的最低成本解决方案。

图21：迷你电网细分市场（迷你电网和可再生能源的作用越来越大）

说明迷你电网是最适合农村电气化解决方案的窗口。

（电网延伸、迷你电网和分布式可再生能源系统的机会）



来源：EUEI PDF/REN21 2014

5.9.1 迷你电网

迷你电网是一种配电网络，可以独立于国家电网输电网运行，通过局域配电网向有限数量的消费者提供小规模发电，通常在10千瓦至10兆瓦之间²⁸。迷你电网是为偏远设施和农村社区供电的最佳选择，因为对他们来说，连接电网的成本太高。

微电网类似于迷你电网，但规模更小，发电量在1千瓦到10千瓦之间。微电网可以更容易地进行定制，服务于具有单独或较小建筑群分散社区。

迷你电网可以定制，以更经济的方式为集中住区提供电力，包括家庭住宅、家庭手工业、企业、机构、电信运营商和偏远的公用事业场所，提供的电力达到或超过电网质量水平。迷你电网可以由电信运营商、公用事业公司、其他专门的私营公司、社区组织或它们的某种组合来运营。

世界上许多地方的迷你电网仍然使用柴油发电；然而，使用太阳能、水电、生物质能或风能等可再生能源解决方案可以降低成本、提高能源安全性并减少环境污染。

²⁷ 《2017年能源获取展望》，www.iea.org/reports/energy-access-outlook-2017

²⁸ 非洲-欧盟可再生能源合作计划（RECP）。迷你电网政策工具箱<http://www.minigriddpolicytoolkit.euei-pdf.org/policy-toolkit>

在远离国家电网的农村地区，迷你电网运营商可以向电信运营商和当地工业等主要客户出售电力，还可以通过向当地社区消费者分配电力获得额外收入。为核心电信运营客户发电和提供服务的铁塔运营公司（TowerCo）也可以向当地社区提供服务，从而增加投资回报。

表4展示了迷你电网的应用和分类以及每种网络的技术特征。联合国“人人享有可持续能源”（SE4ALL）层级系统是用于全球比较的电力接入衡量和评价系统。

电气化解决方案的评估可以按照表4所示的大量应用和质量指标进行分类。

表4：联合国SE4ALL全球跟踪框架11

基于SE4ALL全球追踪框架的能源获取情况	无	基础级	高级			
属性	0级	1级	2级	3级	4级	5级
		工作灯和手机充电	一般照明、电视和风扇	2级和任何低功率电器	3级和任何中等功率电器	4级和任何更高功率电器
峰值可用容量 ¹² （瓦）	-	> 1 W	> 20 W/50 W	>200 W/500 W	> 2,000 W	> 2,000 W
持续时间（小时）	-	> 4 小时	> 4小时	> 8小时	> 16小时	> 22小时
夜间供应（小时）	-	> 2小时	> 2小时	> 2小时	> 4 小时	> 4小时
可负担性	-		√	√	√	√
正规性（合法性）				√	√	√
指示性最低技术		纳米电网/微电网、微微光伏/太阳能灯	微电网/迷你电网、可充电电池、太阳能家用系统	微电网、迷你电网、家用系统	迷你电网和电网	迷你电网和电网

来源：改编自世界银行，2014年。

太阳能、水电、风能、生物质能和燃料电池等可再生能源在清洁能源迷你电网（CEMG）中得到利用，并配有备用电池来平衡全天的供需。在迷你电网中也可以使用柴油发电机作为备用。

实施迷你电网或微电网的一些优势如下：

- 电网级质量的电力。
- 向电信设施和社区快速部署服务（几周或几个月，而不是几年）。
- 可以根据当地的需求进行定制，具有可扩展性和灵活性。
- 更接近被服务的社区，因此降低了传输成本。
- 如果是微电网，有机会让私营部门/社区合作伙伴，通过低压配电线路从当地来源为离网社区（运营商、家庭和企业）提供服务。

迷你电网特别适合于偏远的基站和人口分散的中密度社区，这些社区的人口远离国家电网，居住在电力不可靠的地区，或无法负担得起电网电力的地区。

独立太阳能家用系统适用于当地人口分散，家庭远离电网，需要适量电力的地方。

太阳能和风能技术主要为农村和偏远地区的电信设施供电。据预测，在未来五年内，它们将占全球可再生能源新增容量的80%以上。

表5：能源获取干预措施和指示性能源效率效益 – 不同背景下能源获取+能源效率提升方面机会

获取层级	技术或提供方式	能源效率价值主张
1级	太阳能手提灯/微型光伏	节能发光二极管（LED）从根本上降低了提供服务所需的太阳能光伏和电池的尺寸和成本，提高了这些技术在广大新细分市场的可负担性。
2、3、4级	离网系统	节能电器从根本上降低了能源供应需求，使给定的离网系统规模能够提供更大的服务，而更小、更易于负担的系统能够提供同等服务。
	微电网和迷你电网	节能电器和设备可以增加迷你电网可以支持的连接数量，而且可以降低系统的资本成本要求，有可能提高财务可行性。
	工业/社区用途	能源效率提升能降低能源成本和/或延长磨床、研磨机和泵等电动产品的运行时间。高效太阳能LED路灯能提高公共安全，促进了夜间商业活动。 高效太阳能灌溉泵系统比普通的电动泵更具成本效益。高效医疗应用在电气化不足的农村诊所中运行更可靠，或者需要更小、更易于负担的离网能源系统。
5级	电网电气化/电力行业改革	供应侧和需求侧效率的提高可以提高电力行业的可靠性和财务绩效，降低消费者价格，增加支付能源账单的可能性。在存在补贴电价的行业，效率提升可以降低政府成本。

注：SE4All为全球跟踪能源获取情况制定了一个多级框架。第1级代表非常低级能源服务，第5级包括与更高功率设备的全电网连接。

来源：<https://www.gsma.com/mobilefordevelopment/wp-content/uploads/2014/11/Africa-Market-Report-GPM-final.pdf>

5.9.2 独立系统

独立系统是小规模的电力系统，包括太阳能家用系统和微型光伏系统，它们不与电网配电网连接。一个独立系统可以满足人口稀少和潜在需求较弱地区的个人客户、家庭、小型家庭手工业或商业单位的需求。高达150瓦的太阳能家用系统，可以用来为太阳能灯、室内照明、手机充电、电脑和小型设备供电。微型光伏系统为太阳能灯、收音机和手机充电等项目提供高达10瓦的电力。

独立离网系统利用当地可用的可再生能源，包括生物质能、风能、水电和太阳能。这些系统通常包括储能系统，通常是一个电池组，允许低压直流设备直接由电池供电，或用于照明和小型直流电器。使用逆变器可以产生交流低压，为标准交流设备供电。²⁹

独立系统最适合住宅分散、远离电网、电力需求不大的社区。

独立太阳能系统分类

微型光伏系统（PPS）

- 小型太阳能家用系统 – 功率输出为1至10瓦
 - 主要用于照明、手机充电器、小型IT设备、收音机
- 配备电池和灯的小型太阳能电池板。光伏板可以固定在产品上（如太阳能灯）。
- 易于安装（即插即用），用户应用方便，投资成本低，维护量小，可扩展程度高，使用灵活。

经典太阳能家用系统（SHS）

- 经典太阳能家用系统 – 峰值输出高达250瓦。
 - 由几个独立的组件组成：
 - 模块、充电控制器、电池和负荷
 - 能量管理由充电控制器完成。
 - 经典SHS的优势在于直流负荷：
 - 直流供电的节能灯、收音机、电视和冰箱
- SHS是能源效率非常高的系统，没有任何转换损失。

太阳能住宅系统（SRS）

- 更大规模的独立光伏系统（SRS）
 - 用于微型太阳能系统，峰值输出为2至10瓦。
 - 农村或家庭应用的理想选择
- 为酒店、医院、学校、工厂等大型独立设施提供电力。
- 易于操作和维护
- 离网应用

²⁹ Rashid Al Badwawi等人。《太阳能光伏和风能混合发电系统回顾》，<https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/23080477.2015.11665647?needAccess=true>

- 独立光伏系统的经典元件包括太阳能电池组件、充电控制器、铅酸电池/锂离子电池、逆变器和负荷（电器）。

具有连通性的太阳能套件解决方案即将问世，以最小的成本提供双重解决方案。

5.9.3 可再生能源和化石燃料能源在迷你电网中应用之比较

由于其模块化特征，可再生能源技术可以快速部署和定制，以利用当地可用的资源和能力满足能源需求。

通过将电气化转向可再生资源，可以立即大幅减少化石来源能源的相关二氧化碳（CO₂）排放。不仅空气污染水平会降低，公共健康受益，而且由于互联互通数字经济的发展，还可能会产生相当大的社会经济效益。

表6描述了可用于离网和并网系统的各种可再生能源和化石燃料解决方案的技术特征。

表6：可再生能源迷你电网和离网特点，2012/13年

	并网	迷你电网<50 MW/ 自用	独立系统/个人 电气化系统	生产性使用
燃气	~ 1 500 GW			> 1 GW燃气热电 联产系统
柴油机		5-10 GW 50 000-100 000个 系统		
水力发电	大型 >10 MW 10 000-50 000个系统 >1 000 GW	小型 < 10 MW 100 000-150 000 个 系统 75 GW	微水电 0.1-1 MW 微型水电 <0.1 MW	
风能	310 GW 250 000 个涡轮机	柴油风力混和发电 <1 000 个村庄/采 矿系统	小型风力涡轮 机0-250 kW 806 000 个 涡轮机	风力泵 > 500 000
太阳能光伏	50 GW/50万个大 型系统 >50 kW 80 GW/1000-2000万个 屋顶系统1-50 kW	柴油光伏混合发电 <10 000 个村庄 系统	SHS <1 kW 5-1000万系统	太阳能照明5百 万；电信铁塔10 000；太阳能水 泵；光伏冰箱/制 冷设备；街道照明 系统；交通标志； 电话充电站
生物气/生物 柴油发电	14 GW 30 000-40 000 个系统	< 100 kW 生物气 发电厂 > 1 百万个 生物气系统 气化/稻壳等 1 000-2 000 个系统		牲畜养殖场 备用生物柴油发 电机

表6：可再生能源迷你电网和离网特点，2012/13年（续）

	并网	迷你电网<50 MW/ 自用	独立系统/个人 电气化系统	生产性使用
生物质热电联产	20 GW 纸浆、 糖/乙醇 1 000-2 000个系统 20-30 GW蒸汽循环/ CH1 000-2 000 个系统 5-10 GW混烧燃煤 电厂250-500 个系统			

来源：IRENA，离网可再生能源系统

5.10 迷你电网设施的基本组件：

迷你电网可再生电力系统有几个基本特征，如图22所示。

1) 可再生能源发电机/来源：

电力能从以下来源产生：太阳能光伏模块、风力涡轮机、来自附近溪流或河流的迷你水力涡轮机和生物质电力调节器。

2) 逆变器：

直流转交流逆变器用于将太阳能电池板的电力转换为交流电压，为现场的交流设备供电。有组串式或微型逆变器可供选择；直流-直流转换器将太阳能电池阵列的直流输出电压调整到设备和电器所需的水平。

3) 整流器：

将来自风力、水力涡轮机等交流电压转换为直流，供需要的设备使用。

4) 储能-电池和更高容量的储能系统：

利用可再生能源（太阳能和风能）全天提供可变能量的迷你电网将需要最佳容量的蓄电池，以持续提供电力。这些系统产生的多余电力将被储存起来，并在需要时提供，从而补偿可用性波动。在较小的迷你电网（即300千瓦以下）中，通常使用电池组，而较大的系统则使用其他形式的储能系统，如锂电池。

5) 配电网：

所使用的配电系统类型取决于通过网络提供的服务和将要使用的电器类型。网络可以设计成直流母线，或单相或三相交流母线，以适应系统或网络的特点。对于向个人客户、企业或行业提供服务的网络，需要对消耗进行计量和记录，以便计费。

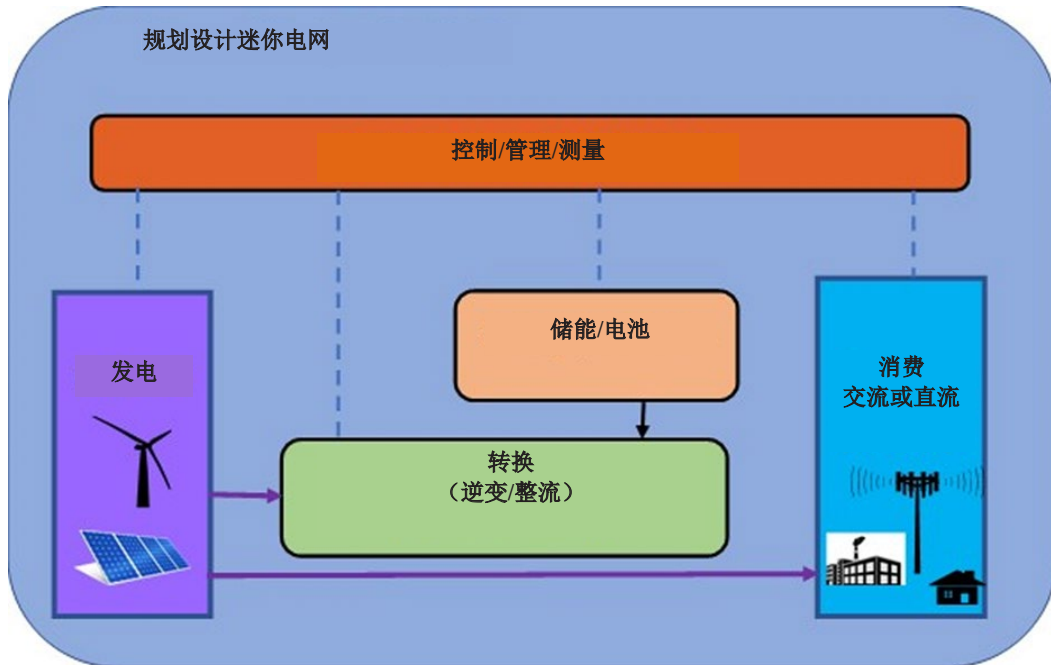
6) 用户/应用子系统：

对于向最终用户提供服务的运营商来说，这可能包括位于客户侧的设备，包括内部布线、电表、接地、ICT设备和电器。

7) 智能管理系统：

执行诸如系统控制、网络管理和优化、收费、提高网络能源效率措施和最终并网等任务。ICT还可用于通过手机进行智能计量和计费/支付自动化。

图22：迷你电网功能



迷你电网的控制功能包括保护策略和智能决策。人工智能（AI）可用于优化可再生能源技术的性能，并最大限度地提高迷你电网的能源效率。人工智能可以帮助准确预测未来的天气状况和负荷需求，激活控制，以提高系统性能并最大限度地降低整体运营成本。

数据通信功能涉及捕捉传感器收集的数据，将其传输给控制器，然后将控制器生成的指令传输给自动化系统中的执行器。³⁰

可再生迷你电网系统的转换功能使从可再生资源产生的能量进行转换和适配，以匹配迷你电网中负荷和储能系统的特性。它们可以根据输入和输出电压来分类：

- 转换器提供直流转直流和交流转交流适配
- 整流器将直流电转换为交流（例如，从太阳能直流电源向交流负荷供电）。
- 逆变器将交流转换为直流（例如，从交流柴油给直流电池/储能系统充电）。

迷你电网或微电网可以设计成交流或直流电网，具体取决于所要服务的主要负荷。

成网逆变器能够在自主可再生能源迷你电网中建立一个交流电网。

³⁰ https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2016/IRENA_Innovation_Outlook_Minigrids_2016.pdf

5.11 太阳能供电农村宽带网络 – 苏格兰跳房子（Hopscotch）

跳房子是一个专门为农村连通性设计的太阳能供电宽带网络。

案例研究 – 苏格兰跳房子基站网络

跳房子是在苏格兰西海岸人烟稀少的偏远高地和岛屿上测试的宽带网络装置。试点是在远离最近的互联网交换点并且无法接入电网的农村地区进行的。建立宽带基础设施，利用柴油发电机供电的移动基站来覆盖广大的农村地区，需要在无法获得电网电力或电网电力不可靠的地区进行大量资本投资。除了高昂且不断增加的燃料成本以及燃料运输和维护的额外费用之外，柴油机的噪音大且排放二氧化碳气体。

无线网络

跳房子基站测试装置在5 GHz Wi-Fi和UHF“空白频谱”频段上运行的无线电系统，利用以下方式社区提供照明：

- 低功耗点对多点（PTMP）无线接入系统（类似于Wi-Fi），连接到IP骨干网
- 点对点（PTP）无线中继回程链路将基站连接到核心网络，或者在可用的情况下，BTS可以直接连接到IP骨干网；
- BTS由WindFi、离网、混合可再生能源供电 – 太阳能光伏板、风力涡轮机和蓄电池。这些无线电旨在最大限度地减少完全由可再生能源供电的电力消耗，而不像传统蜂窝基站的冷却系统需要大量电力。

布特岛上的“WindFi”基站原型 – 2010年



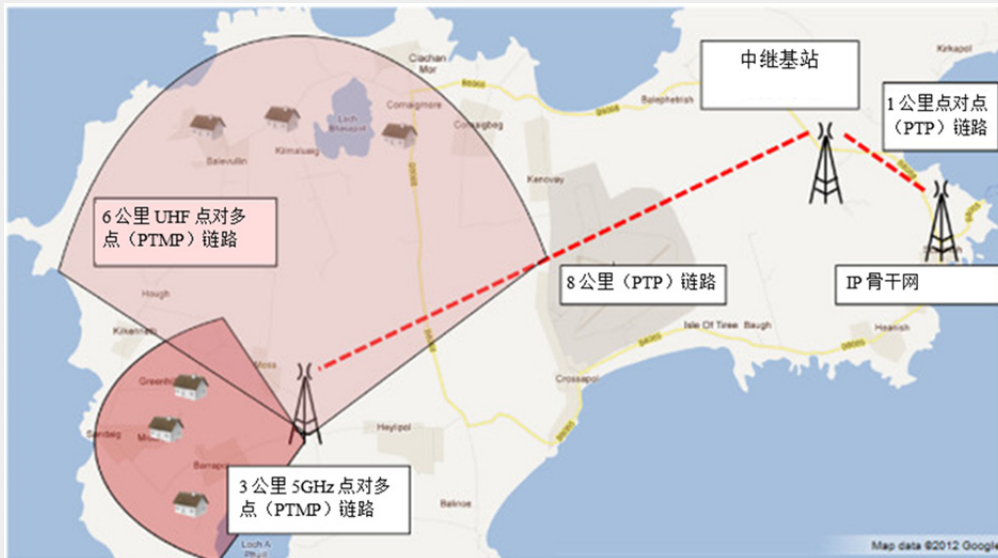
苏格兰布特岛上的“WindFi”基站原型。基座包含太阳能电池板和电池，上面有一根10米长的桅杆支撑着风力涡轮机，下方为天线和无线电设备。

来源：<https://jwcn-eurasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/1687-1499-2012-112/figures/4>

跳房子无线电系统特征

- 利用点对点（PTP）5 GHz频段C（5.725-5.850 GHz）变体提供回程连接
 - 最大EIRP为4 W – 基于IEEE 802.11n标准的无线电
 - 总频谱125 MHz – 两个不重叠的40 MHz宽turbo通道
 - 垂直和水平极化上两个速率为300 Mbit/s的独立空间流

将远程社区连接到IP骨干网的跳房子网络示例



跳房子：用于农村宽带接入的低功率可再生能源基站网络

来源：<https://jwcn-erasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/1687-1499-2012-112/figures/1>

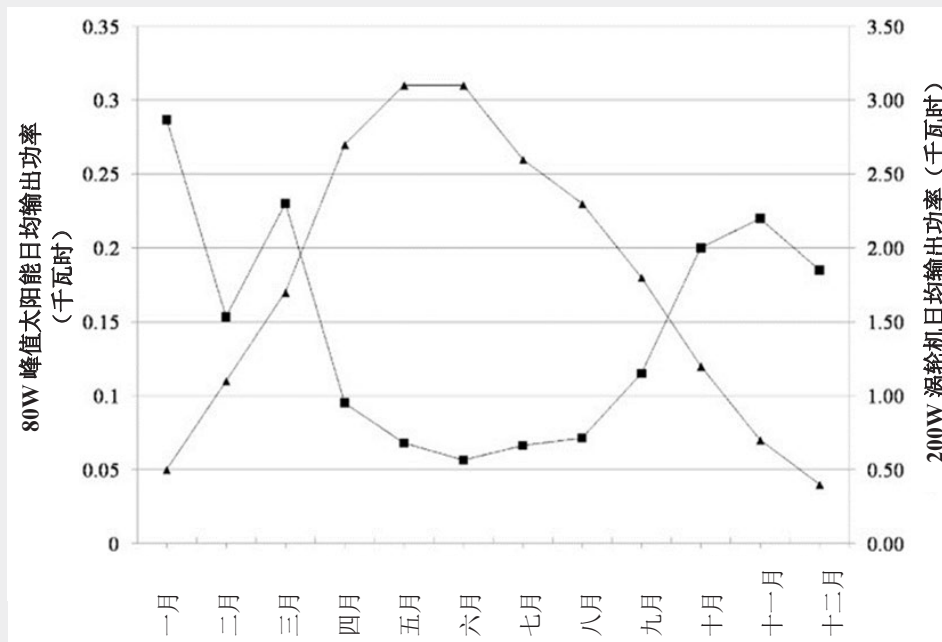
- 在5 GHz频段工作的点对多点用于为基站附近（3公里）的客户提供服务
 - 根据社区规模，每个站点的扇区数量灵活（2至6个扇区）。
 - 中等规模的社区 – 4个扇区
 - 非授权频段B（5.470-5.725 GHz）。不重叠11 × 20 MHz或6 × 40 MHz信道
 - 8至10个宽带用户，速率为65 Mbit/s（根据需要扩展）
 - 最大EIRP 为1 W
- 超高频系统
 - 叠加电视空白频谱UHF频段，由于其传播特性，用来将覆盖范围扩大到6公里，但以牺牲吞吐量为代价。
 - 400 MHz电视空白频谱频段。
- 桅杆高10米（安装有风力涡轮机、太阳能光伏板、无线电设备和电池）

可再生能源解决方案

WindFi是一个超低功率基站，在特定站点（如图）使用：

- 风力涡轮机（200 W）
- 带跟踪系统的太阳能光伏（80 W）模块
- 如图所示，在苏格兰，太阳能和风能是免费的可再生资源
- 基站一年365天，每天24小时都有供电
- 备用电池 – 连续运行 – 3天备用
- 电池“放电深度”不超过50%

风能和太阳能的日发电量



苏格兰蒂里（Tiree）岛上一个80瓦的光伏模块(•)和一个200瓦的风力涡轮机(•)的平均日发电量，基于光伏地理信息系统的太阳辐照预测数据和蒂里机场测量的平均风速，风力涡轮机用于为一个“WindFi”基站供电。

来源：<https://jwcn-eurasipjournals.springeropen.com/articles/10.1186/1687-1499-2012-112/figures/5>

可再生系统规模规划

计算无线电、接入系统和管理的总负荷。然后，根据峰值负荷、50%的放电深度（DoD）和3天备用的要求确定电池组的规模。太阳能电池板的规模需要考虑光伏地理信息系统的辐照数据和附近机场的平均风速数据，以满足峰值负荷的需求。

5.12 混合电力系统

混合电力系统同时使用可再生能源和化石燃料发电技术或储能。迷你混合和微混合、离网、分布式发电系统可以为远离主要电网且几乎没有联网前景的农村设施和社区提供方便、经济、可靠的电气化服务。混合电力系统可以将可再生能源系统 – 通常是光

伏或风力发电与电池能源或储能系统相结合，并根据需要提供由柴油或其他矿物燃料驱动的发电机组。还提供其他子系统，如逆变器、整流器和其他控制管理和调节系统。

可再生能源驱动的小型混合系统是向偏远设施和地方机构提供基本、可靠电力服务的合适解决方案，如电信和ICT运营中心、卫生中心、商业组织、小型工业、商业/办公服务、政府机构和车间/职业培训机构。

案例研究：格陵兰电信（TELE Greenland）

格陵兰电信（TELE Greenland）开发了一套计算机控制的混合电力系统，用于为格陵兰岛上无人值守的1.5千瓦无线电中继器站点供电五年。该系统使用每块输出功率为4800瓦的太阳能电池板、容量为4500Ah的电池和一个小型柴油发电机。它包括一块配电板和监控设备。电池为由太阳能电池充电的电信设备提供一次电源。格陵兰电信报告称，与长期运行的柴油发电机相比，节省了80%的燃料，维修次数也减少到每年一次。

混合迷你电网的主要驱动力包括：

- 需要可靠和负担得起的电气化服务；
- 节省燃料，依赖或消除柴油发电；
- 减少二氧化碳排放。

农村和偏远地区的可再生混合迷你电网有多种多样的应用和配置。与储能相结合时，它们可以平抑和管理可再生能源发电的可变性，以满足全天的负荷需求。

迷你电网通常用于以下用途：

- 电信铁塔设施、水站等公用设施
- 社区服务 – 家庭、政府机构、教育机构、医院
- 当地企业和校园设施等。

发电量低于5 kWp的混合微电网方案可用于满足小型农村社区、偏远电信基站（低容量站点）的电气化需求，与柴油发电机结合使用，可以非常有效地减少燃料消耗，同时提供高可靠性。

在5至30 kWp范围内运行的小型分布式光伏混合系统适合于小型偏远/农村无线接入中继器站点和移动基站，为家庭提供照明以及为当地卫生中心、培训中心、家庭手工业和其他社区服务提供独立系统。

在30至100 kWp范围内运行的中型混合系统需要更先进的电气化能力，适合于生产率活动较高的社区，为大型电信设施和小型地方工业提供电力。

混合电力系统可以有多种配置：

- 配备柴油发电机迷你电网/微电网解决方案的太阳能光伏发电
 - 适合于历史上依赖柴油发电机和一次电源的网络或电网不可靠的网络，可部署可再生能源以减少燃料使用，最大限度地降低OPEX和维护成本，同时减少温室气体排放
 - 适合没有足够空间建造大型太阳能电池阵列发电站的地方
 - 提高可靠性并允许更模块化的网络设计
- 太阳能光伏和风力涡轮机
- 太阳能光伏、风能和柴油发电机

5.12.1 混合交流迷你电网

通常，交流混合电网系统将来自交流电源的电力直接供向电网，而来自可再生直流电源（如太阳能光伏）的电力，将采用逆变器进行电力转换，向交流电网供电。来自交流电网的电力将被整流，为备用电池或储能系统充电。当交流电源不可用时，可从再生资源或电池中获取直流电力，通过将其直流电力转换回交流电力，为负荷供电。

与峰值需求相匹配的设计必须考虑到，对于社区规划，峰值负荷在一天中会有很大的波动。日间峰值负荷需求主要来自办公室、企业和商业用户、中心、学校和卫生设施以及其他机构等的运行。夜间负荷主要由住宅需求决定：照明、制冷、家用电器和娱乐系统。

在混合网络中，如果使用柴油发电机组，可以支持峰值负荷，以提高可靠性并确保电池和储能系统以最佳方式充电。混合系统的设计必须最大化地降低投资成本，并优化系统的资本支出和运营支出。

图23提供了一个交流耦合系统的图示，该系统由配备逆变器的太阳能和风能来源供电，结合了一个柴油发电机组，通过稳压系统直接向交流负荷供电。该系统的设计确保电池的最佳充电状态，以平滑电力需求，并在主电源不可用时作为备用电源。

5.12.2 混合直流迷你电网系统

电信网络通常由配有备用/待机电池的48伏直流系统供电，以保持高可靠性并确保全天候的可用性，而IP设备设计为主要使用交流电，因为它们需要大功率。

直流迷你电网配电可以直流负荷供电提供更高的能源效率和更好的可持续性，避免了交流电网所需的直流-交流-直流转换导致的低效率（EMerge Alliance，2015年）³¹，因为转换会导致效率降低3%或更多（Willems等人，2013年）³²。通过利用直流供电的电

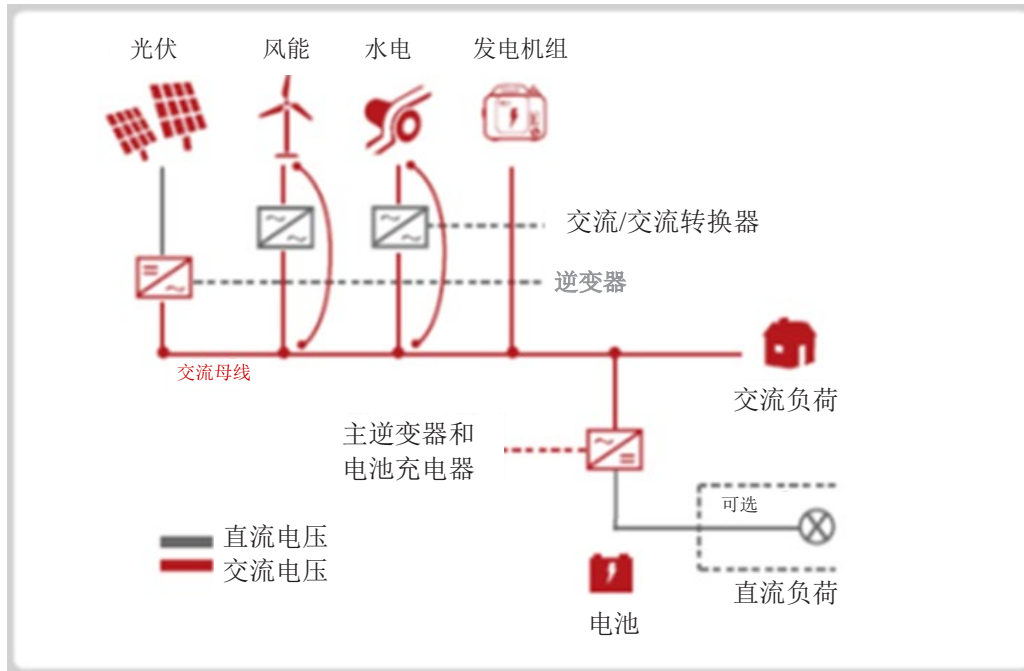
³¹ 爱思唯尔图像联盟，《直流与交流迷你电网的比较》<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S2352484719300617?token=1CC673EF309F79143500252E66AA3A5642A79806AB4AD265761B8C9871538F1E3D0802384DFD3C1A8CE766B4EAB4B5A6>

³² Willems, S., Aerts, W., De Jonge, S., Haeseldonckx, D., van Willigenburg, P., Woudstra, J., Stokman, H., 2013年。鲁汶大学协会资源库（Lirias）：直流微电网的可持续影响和标准化。在生态设计国际专题研讨会上发表，鲁汶大学，大韩民国济州岛

器，可以显著提高效率，因为这种电器运行起来更高效、更经济，例如直接由光伏电池供电的12伏LED灯泡，无需逆变器，能节省高低30%的电力消耗（Graillot，2013年）³³。

图24显示了一个使用太阳能光伏、风力涡轮机和备用电池系统的混合直流迷你电网，为一个只有直流负荷的远程电信基站供电。

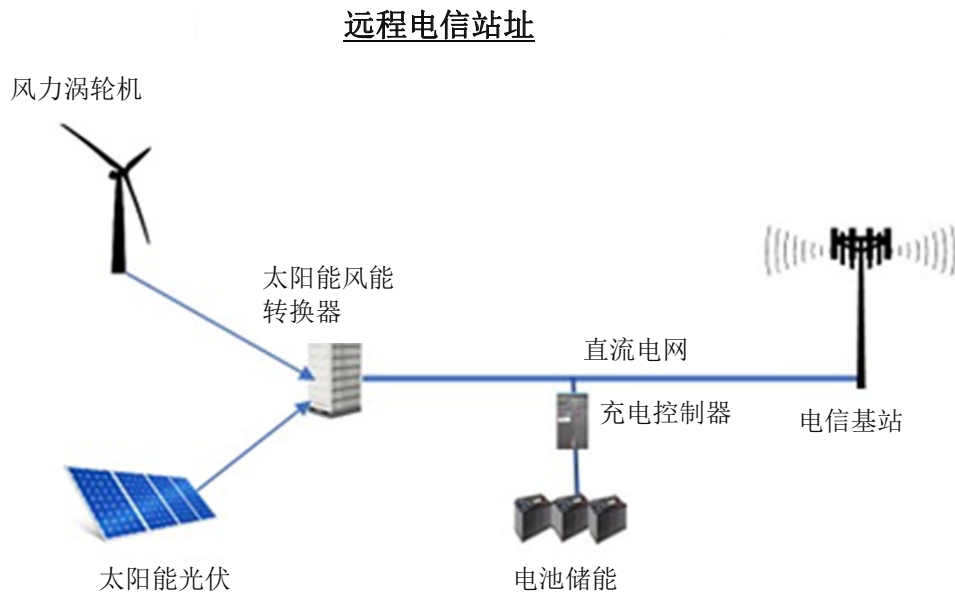
图23：交流耦合混合迷你电网电力系统



来源：配备系统组件的交流迷你电网系统示意图，改编自ARE（2011年）<https://www.ruralelec.org/sites/default/files/inensus-toolkit-en-21x21-web-ok.pdf>

³³ IRENA，2016年 – 创新展望：可再生能源迷你电网

图24：混合直流电网 – 风能和太阳能光伏



5.13 太阳能和柴油混合发电

太阳能电池板使用寿命很长。制造商宣传的寿命为20至25年，超过这个时间后，输出功率会下降到原有产出的80%左右。寿命长的原因是，太阳能电池板没有活动部件。只有紫外线（UV）的缓慢降解作用才会造成电池板的磨损。

太阳能光伏柴油发电机迷你电网使用电池或其他储能系统，来平衡全天供应给负荷的能量，并确保满足峰值负荷需求，同时最大限度地减少柴油运行时间和燃料使用。

太阳能光伏系统的设计必须满足日间峰值负荷；多余的能量可用于为备用电池充电。电池的尺寸必须能够在所有一次能源都不可用的最坏情况下提供备用电源。在最坏的情况下，这可能会持续几天，例如在很长一段时间内可能无法获得阳光直射。

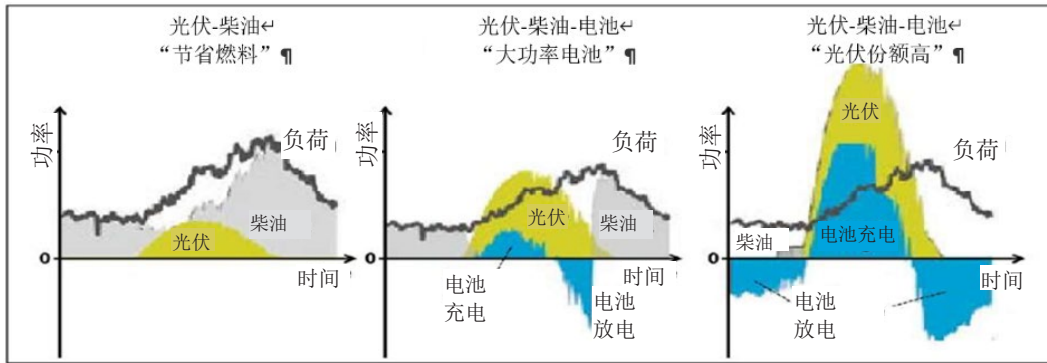
另一方面，由于需要燃料、进行清洁和更换过滤器，柴油发电机具有持续的运行成本。尽管柴油发电机一开始很便宜，但随着时间的推移，其净成本会逐渐增加。柴油发电机也不可靠，经常需要昂贵的大修来保持运行。出于这个原因，大量的案例研究发现，从长远来看，太阳能发电机是一个更便宜的选择。³⁴

尽管如此，柴油发电机仍然是发电的热门选择，因为太阳能光伏发电的购买成本是柴油发电机组的五倍以上。如果没有融资，获得资本的机会有限的社区可能没有资源支付太阳能的大笔前期费用。然而，由于柴油发电机的燃料、运输和定期维护成本，太阳能光伏发电的终身成本会更低。

³⁴ [太阳能电灯基金；加扎马达大学；阿布巴卡尔·塔法瓦·巴勒瓦大学；阿尔巴明奇大学；及印度理工学院](#)

为了确定系统的规模，必须确定柴油发电机的负荷因子和电池循环次数，因为这些对系统的生命周期成本有重大影响（IEA，2013年）。图25显示了一个典型的日间负荷曲线以及柴油发电机和太阳能光伏系统的运行情况。

图25：混合系统不同运行模式的图示



来源：德国国际合作机构（GIZ）德国气候技术倡议太阳能混合迷你电网推广，2016年8月

5.14 太阳能光伏柴油发电机

状况：巴基斯坦现场没有电网，之前只有柴油供电

建议的解决方案：混合太阳能光伏、柴油发电机、锂离子电池组

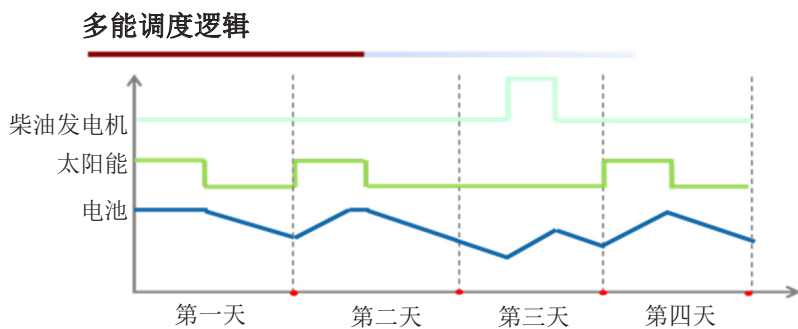
结果：

- 柴油发电机平均每天运行不到两个小时。
- 该系统产生的能量比纯柴油解决方案多12%。
- 燃料消耗减少80%。



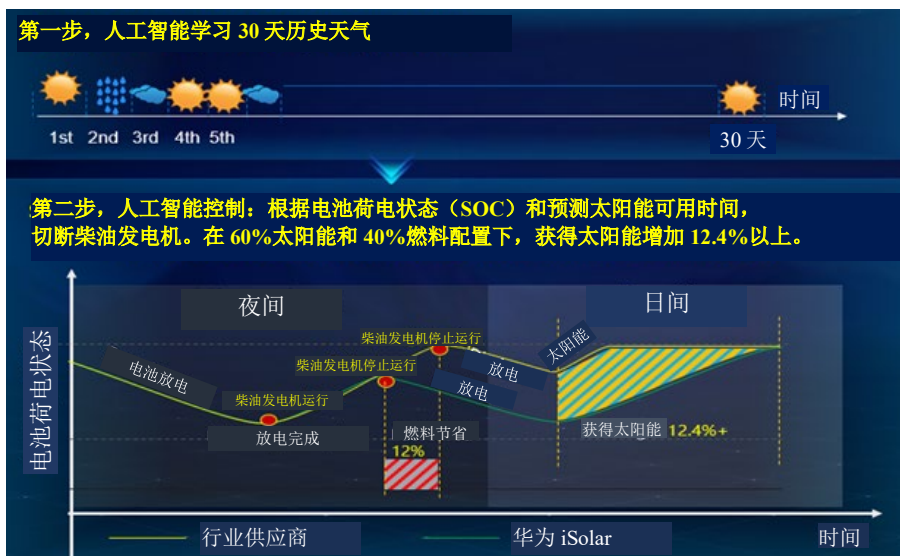
来源：华为

充电和放电循环如下图所示。



利用人工智能技术控制柴油发电机。如下图所示，当电池电压达到最小放电阈值时，柴油发电机开启。在没有人工智能的正常情况下，只有当太阳能光伏板的能量达到峰值功率的12.4%时，才会关闭柴油发电机。

通过人工智能控制，系统可以预测第二天的日出时间，即太阳辐照度足以为电池充电的时间，以便在较早的时候关闭柴油发电机。监测充电的电池水平，并利用人工智能技术来预测电池电压阈值在什么范围以及在什么时间太阳能光伏源可用，以便在一天中充分地给电池充电。



华为案例研究

华为混合迷你电网可再生能源农村解决方案 – 降低巴基斯坦移动运营商Ufone的运营成本

Ufone隶属于Etisalat公司集团，是巴基斯坦第四大移动通信运营商，拥有14%的市场份额和2200万用户。Ufone运营数以千计的移动基站，其中一些位于城市地区，由主电网供电，另一些则在偏远农村地区离网运行。Ufone在8 000多个站点安装了柴油发电机，为电网不稳定地区的基站提供稳定的备用电源。由于长时间停电，柴油发电机一次不得不运行数小时。城市的平均停电时间为6至10小时，而一些农村城镇和村庄的平均停电时间为8至20小时。

巴基斯坦移动市场的竞争导致运营商的每用户平均收入（ARPU）非常低，仅为2.50美元，Ufone因此研究了网络成本，并寻求降低运营和资本成本的方法。在电网供电不可靠的地区，高额的运营维护成本，特别是柴油发电机的燃料成本，被确定为一个主要问题和降低成本的目标领域。

基于使用太阳能、光伏系统、蓄电池组和柴油发电机（作为备用）的各种组合，华为针对Ufone提出并实施了四种混合电力解决方案。尽量减少柴油发电机的运行或完全取消柴油发电机将减少环境污染。

模式1：经历6-8小时停电的站点

华为建议：

- 取消柴油发电机，并
- 安装快充电池（3-4小时充满电）。

这是一个充分的解决方案，因为不再需要柴油发电机和以前的铅酸电池组。

模式2：经历10-16小时停电的站点

华为提出了柴油机组和以下混合解决方案，即：

- 具有一小时快充能力的锂电池，容量更大，循环寿命更长（100 Ah，循环寿命3 500次）。



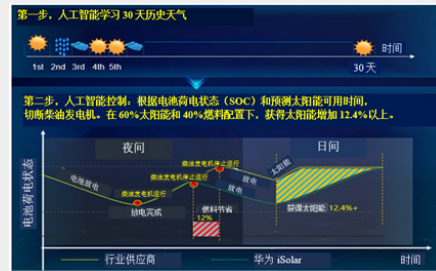
- 作为待机的快充电池，提供在待机模式下2-3小时快充（100 Ah，循环寿命2 000次）。

模式3：经历16-20小时停电的站点

华为建议取消柴油发电机，并安装混合解决方案：

- 安装太阳能光伏阵列。
- 2小时快充锂电池。

该解决方案是适合的，不需要从替代来源获得任何电力供应。



模式4：站点独立，不接入电网。

华为建议实施太阳能、发电机、电池、人工智能管理的混合解决方案：

- 安装太阳能光伏阵列
- 2小时快充锂电池
- 柴油发电机作为备用

该解决方案将柴油发电机的运行和燃料使用减少了80%，因为太阳能电池阵产生的电力足以支撑通信设备运行并为锂电池充满电。人工智能技术被用来预测发电机运行的最佳时期并控制其运行。

5.15 储能解决方案

储能提供或吸收电力，以平衡供需，并抵消客户负荷和发电量的波动。³⁵

由于太阳能和风能技术的成本迅速下降，产量不断增加，可再生能源系统正在成为大多数离网应用的标准。电力存储正在成为离网解决方案的关键组成部分，并直接影响到这些目前严重依赖柴油燃料的关键能源使用领域的脱碳举措。

据估计，随着电池技术的改进，到2030年，电力存储总容量可能会增加两倍。电池储能技术的成本预计将下降高达66%³⁶。随着电力存储技术的价格继续下降，变得更易于负担，迷你电网中使用的可再生能源的份额将继续增加，其技术、经济和社会效益也将不断提高（IRENA，2016年）。

5.15.1 铅酸电池

几十年来，铅酸蓄电池一直是占主导地位的储能技术，作为柴油发电机的备用解决方案，为全球城市和农村地区的电网或离网电信设施供电。铅酸电池有两大类，一类是湿电池（满液式非密封电池），另一类是阀控铅酸电池（VRLA），后者使用凝胶或吸收玻璃垫（AGM）密封电池组。对于需要缓慢放电或在较高环境温度下运行的应用，密封凝胶电池是首选，而AGM具有更好的充电率。

³⁵ SE4All清洁能源迷你电网高影响力机会（SE4All HIO CEMG）。扩大电力接入的离网可再生能源解决方案 https://irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jan/IRENA_Off-grid_RE_Access_2019.pdf

³⁶ <https://www.powerelectronics.com/alternative-energy/6-promising-energy-storage-options-tie-grid>

铅酸电池是一种廉价的、广泛部署的充电技术。它们适用于广泛的应用；然而，它们的能量密度低，生命周期非常短，充电深度差。它们的最佳工作温度范围也十分有限。

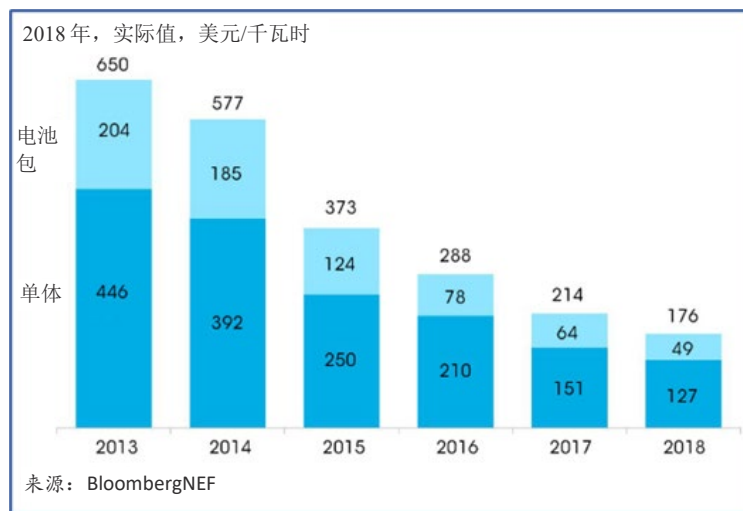
满液式电池需要热管理系统，而且需要定期维护以更换水。另一方面，VRLA电池设计有自动调节阀，可以防止电解质流失，尽管比满液式电池更贵，但其生命周期更长，可以在无需维护的情况下运行10年。

如果放电到50%以下的放电深度，铅酸电池的寿命将会缩短，而锂电池可以放电到80%而不会有明显的长期损害。

5.15.2 锂电池

近年来，锂离子电池经历了最快速的增长和成本下降，这主要是受电动汽车发展的推动。由于其卓越的能量密度，锂离子电池主要用于移动和便携式设备以及消费电子产品。2017年彭博新能源调查报告（见图26）指出，2010年至2018年，锂离子电池组的平均价格下降了85%，并将在未来几十年内继续下降，这主要是由于产量增加，而且受交通运输业和研发驱动。IRENA预测，固定应用领域的锂离子电池安装成本将大幅下降，从2016年下降54%到2030年下降64%。³⁷

图26：锂离子电池价格调查：电池包和单体划分



锂电池是部署最广泛的电池储能解决方案，在全球超过90%的电网电池储能市场中使用³⁸。它们能够在日间太阳能充足和更便宜的时候经济地储存能量，然后在夜间居民需求增加时释放能量，这将推动更多的太阳能发电。同样，夜间风力发电场产生的低成本、过剩的风电可以储存起来在白天释放，以满足峰值需求。

与铅酸电池相比，锂电池具有以下优势：³⁹

- 能量密度高，重量低（新的创新包括用硅取代石墨）。

³⁷ IRENA, 2017年电力存储成本

³⁸ 环境与能源研究会情况简报：储能（2019年）<https://www.eesi.org/papers/view/energy-storage-2019>

³⁹ 锂离子电池 – <https://www.usaid.gov/energy/mini-grids/emerging-tech/storage>

- 与铅酸电池不同，可以承受更深的放电深度（DoD），而不会出现明显的劣化。
- 生命周期成本较低，使用寿命明显延长；充电循环次数（特别是磷酸铁锂电池）约为铅酸电池的六倍。
- 可以非常迅速地充电（锂电池可以在30分钟内充满），且在长时间闲置后只损失一小部分电量。
- 免维护，不需要垂直存放或放在通风的隔间里。
- 效率提高。
- 近年来价格下降，[锂电池](#)对离网能源设施越来越有吸引力。

5.15.3 液流电池

液流电池与传统的充电电池不同，它们的电活性材料并不全部储存在电极周围的电池内，而是溶解在电解质溶液中，这些电解质溶液分别储存在阳极和阴极两侧的独立槽中。

液流电池的能量密度比锂离子电池低，但其能量和功率特性可以独立扩展。

5.15.4 飞轮

需要储存余能时，飞轮可以通过加速无摩擦外壳中的旋转质量，以旋转动能的形式储存能量。当需要能量时，通过降低飞轮的转子速度，将动能释放回电能。

飞轮适用于较短的放电时间（几秒钟到几小时），并用于电力管理，如提高电网稳定性。它们通常被用于调节和改善电力质量。飞轮被用来平滑风力涡轮机发电场输出的能量。它们能够在几秒钟的极短时间内释放出大量的电力。

虽然安装成本很高，但飞轮具有很高的功率潜力，可以在超过150 000个循环内达到100%的放电深度，而不会随着时间的推移而劣化。由于高达每小时15%的极高放电率，它们的待机损耗也相对较高，因此适合于短期储能。

5.15.5 固态电池

近几十年来，固态电池受益于大量的研究投资。正在开发的电池具有固态阴极和阳极，在它们之间有固体电解质，而不是液体。因此，它们更加耐用，使用起来非常安全。固态电池还具有比标准锂离子电池更高的能量密度。然而，它们非常昂贵，通常不具备商业可行性。

5.15.6 超级电容器

超级电容器是另一种新兴的储能系统技术，可以提供比传统电池更高的功率密度，比传统电容器更高的能量密度。在越来越多的应用中，超级电容器正成为一种有吸引力的电源解决方案。超级电容器是一种双层电容器，具有非常高的电容，但电压限制较低，比电解电容器储存更多的能量。电能储存在电极-电解质界面上，该界面由两块金

属板组成，上面涂有多孔活性炭材料，这种材料具有更大的表面积，可储存更多电荷。极板浸没在电解液中。

超导体具有高功率密度和处理高负荷电流优势。它们的效率很好，循环寿命长达数十万次，温度范围广。

超级电容器非常适合需要多次快充/放电循环的应用，可以在几秒钟内完成充电。它们是短期电力需求的理想选择，例如在稳定电网（稳定电压和频率）方面。它们也被用于消费电子产品、风力涡轮机的不间断电源系统和配电网使用的设备等。

一个主要的缺点是它们的能量密度低。因此，它们不适合用作连续的存储电源。

5.16 无线电力传输

无线电力传输（或传送）技术（WPT）被认为是一种颠覆性技术，因为它有望在最具挑战性的场景下提供电力。通过无线电波输电的努力可追溯至尼古拉·特斯拉于1899年进行的早期工作。1899年，特斯拉首次尝试在没有电线的情况下进行输电。他采用了150 kHz低频功率，但他的尝试未获得成功。于2014年发布并在2021年之前多次更新的ITU-R SM.2303号报告提供WPT使用射频波束以外技术的信息，对ITU-R第210-3/1号课题给予部分回答。在麻省理工学院（MIT）做出演示后，正在探索几种有前途的WPT技术（包括电磁感应、共振耦合、通过射频波束的传输等）。详情见上述ITU-R报告。

ITU-R正在认真研究此类WPT系统与无线电通信业务之间的影响，一些建议书已经获得批准（见<https://www.itu.int/rec/R-REC-SM/en>）。有关人体暴露于电磁场等安全问题的进一步研究也在进行中。

图27：无线电力传输典型场景



Y.4202(19)_F01

5.16.1 使用通过射频波束进行无线电力传输的电力接入

无线充电技术在不断演进，当前支持不考虑距离的辐射传输（波束WPT）。与使用感应、共振和电容耦合技术的非波束WPT相比，波束WPT技术可在一些应用中提供实质性改进。

波束WPT技术可被设计用于不同规格的家庭和办公室电子装置，以及医疗、工业、零售和汽车等行业中，确保不同产品之间相互兼容。这些装置包括可穿戴设备、助听器、耳塞、蓝牙耳机、物联网设备、智能手机、平板电脑、电子书阅读器、键盘、鼠标、遥控器、充电式照明灯、圆柱电池、医疗设备，以及有类似充电需求的任何其他装置。如果没有波束WPT技术，这些装置就需要电池或连接到一个电源插座上来充电。

波束WPT发射机使用窄带频谱（通常是400 kHz或以下）将射频能量传输至其客户端设备。发射机在被授权客户端设备识别、验证并确定放上WPT充电板之前处于不活动状态。波束WPT空中技术在类似频谱内工作，依靠天线阵列和波束聚焦技术将射频能量传输至客户端设备的精确位置。由于一些无线充电系统的波束WPT输电被引导至客户端设备，因此这些设备不应被视为全向辐射器，因为它们的能量被集中至特定位置，并且仅在存在授权客户端的情况下才传输。

图28：点对点WPT图像



图29：使用26 m抛物天线和450 kW、2.388 GHz速调管作为发射机和3.4 × 7.2 m整流天线阵作为接收机进行的1英里点对点电力传输实验



在射频波束WPT系统中，采用天线来发射并接收无线电波。发射和接收天线在电磁方面并不耦合。因此，一些发射机和接收机不受发射机和接收机电路参数的限制。射频波束WPT系统的主要原理基于弗林斯传输公式。传输无线电力的无线电波并不像无线通信系统那样需要调制。

美国的几家公司已经为需要远距离传输的用例开发了波束WPT技术。2020年，展示了一款面向零售商的数字货架标签系统，该系统无需电线和电池。该系统在2.4和5.8 GHz频段内工作，工作范围约为10米，还能够为智能手机、兼容的智能家居设备、汽车传感器和许多其他设备供电。已经开发出其他技术，在不同的频率下工作。不过，现有的波束WPT技术当前尚未获得FCC授权在美国的公共环境中的更大距离上操作。另一家公司使用工业、科学和医疗（ISM）频段（在毫米波范围内）。

关于使用射频波束WPT的应用的其他信息，请参见更新至2021年的ITU-R SM.2392号报告。

5.16.2 使用通过其他技术进行无线电力传输的电力接入

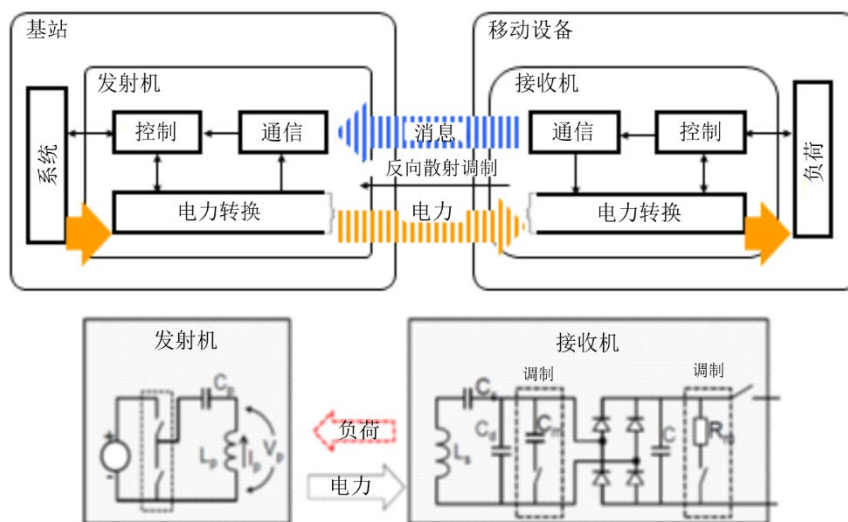
ITU-R SM.2303号报告中还介绍了以下技术。

磁感应WPT技术

磁感应WPT是一项广为人知的技术，使用的原理与传统变压器的原理相同，即初级和次级线圈电感耦合，共用一个导磁芯来改善耦合。初级线圈和次级线圈物理隔离、通过空气的感应电力传输是一项已经存在了一个多世纪的技术，也称为紧耦合WPT。这种技术的一个特征是，如果通过气隙大于线圈直径，并且线圈不在偏距内对齐，电力传输的效率下降。电力传输的效率取决于电感器之间的耦合系数（ k ）及其质量（ Q ）。相比磁共振方法，这种技术可以获得更高的效率。这种技术已在智能手机充电领域实现商业化。利用一个线圈阵列，这种技术还能使发射机灵活地确定接收线圈的位置。

目前使用量最大的WPT设备是便携设备和移动设备。IHS消费者调查显示，美国有35%的消费者使用无线充电技术为他们的移动设备（主要是智能手机）充电。无线充电联盟网站指出，截至2017年年中，约1.5亿台WPT发射机用于智能手机充电。

图30：典型磁感应式WPT系统方框图



SM.2303-3-01 号报告

磁共振WPT技术

磁共振WPT也称为松耦合WPT。这种磁共振方法的理论基础于2005年第一次由麻省理工学院（MIT）提出，并于2007年得到实验验证。该方法使用一个线圈和电容器作为谐振器，通过发射机线圈与接收机线圈之间的电磁共振（磁共振耦合）来传输电力。通过用高Q系数来匹配两个线圈的共振频率，电力可以在两个线圈之间的磁耦合较低的情况下进行长距离传输。磁共振WPT可以在几米远的距离上传输电力。

该技术还能使发射线圈灵活地确定接收机线圈的位置。实际的技术细节可以在ITU-R SM.2303号报告中找到。

6 可再生能源投资金融机制

虽然最不发达国家（LDC）拥有全球13%的人口，但国内生产总值（GDP）仅占世界GDP的2%，在实现可持续发展目标方面面临严重的结构性障碍（联合国最不发达国家、内陆发展中国家和小岛屿发展中国家高级代表办公室（UN-OHRLLS），2017年）。2016年，最不发达国家平均电力接入率为44.8%，而全球电气化率为87.4%，最不发达国家远未实现到2030年普及现代能源的目标。由于施工成本高，连接和运营成本高，再加上缺乏投资，阻碍了向农村地区扩展接入（UN-OHRLLS，2017年）。

在最不发达国家中，城市地区的电力接入往往远远高于农村地区。2016年，75%的城市人口接入了电力，相比之下，只有31%的农村人口接入了电力。但在农村地区，由于基数很低，电力接入的增长速度仅略快城市地区。由于迷你电网项目需要高额前期投资，电价通常高于基于电网的电价（除非对迷你电网有大量补贴），而这可能是农村企业和家庭无法负担的。

从区域角度看，最不发达国家的能源接入情况也各不相同。2016年，亚太区域最不发达国家的平均电气化率达到73.6%，而非洲最不发达国家的电气化率则低得多，只有30%。⁴⁰

6.1 农村可再生能源基础设施融资

多年来，发展中国家农村地区绿色迷你电网融资对私营开发商来说是一项重大挑战。造成这种情况的主要原因是绿色能源技术成本高，而高成本给此类项目的盈利能力带来的挑战。在过去的10年里，这一成本已经大幅下降，但第三世界农村地区的收入水平非常低，这意味着世界这些地区基本上仍然无法获得清洁能源技术。

2013年，非洲能源基础设施需求总额估计为630亿美元。这一年只有12%的融资需求得到满足，其中50%的融资来自国内（来自各自政府），其余来自外部⁴¹。非洲国家的税收占国内生产总值的比例普遍较低，因此，缺乏足够的收入为当地能源基础设施的发展提供融资。

建议这些国家提高国内收入的方法之一是减少政府在碳氢化合物燃料补贴支付等方面的支出。这种节约成本的战略，加上其他战略，可以给政府提供财政空间，向绿色迷你电网解决方案的私营开发商提供税收和其他财政激励。这些激励措施是有益的，但也给投资者带来了新的挑战：它们的可持续性存在不确定性，因为它们所依据的政策可能会在项目周期内发生变化。即使考虑到这些激励措施，启动成本仍然非常高。

电信铁塔 – 主要客户

⁴⁰ 联合国《最不发达国家的能源接入情况及主要挑战》<https://www.un.org/ldcportal/energy-access-and-main-challenges-in-the-ldcs/>

⁴¹ Sy, Amadou和Copley, Amy（2017年）：缩小非洲能源基础设施的融资差距：趋势、挑战和机遇。政策简报，非洲增长倡议，布鲁金斯学会，华盛顿特区。https://www.brookings.edu/wp-content/uploads/2017/04/global_20170417_africa-energy-infrastructure.pdf#page=10&zoom=auto, -99, 92

电信业为私营开发商提供了一个巨大的机会。电信行业在第三世界的离网农村地区正经历着非常快速增长。这之所以成为可能，是因为网络运营商自己生产离网电力，通常使用柴油发电机，但越来越多地转向可再生能源，以运行移动基站。为了提高基站的安全性，降低电力成本，增加收入来源，并促进移动电话在这些离网社区的使用，电信运营商正在尝试不同的方法，通过移动技术改善公共事业项目⁴²除了向基站提供电力之外，还向当地社区提供电力（Taverner, 2010年）。这些方法中最重要的是将电力外包给私营开发商，由移动基站提供稳定的主要电力需求。围绕向移动基站提供电力的业务，可以让私营开发商为周围的社区提供有利可图的电力。虽然网络运营商和迷你电网解决方案的私营开发商之间的这种合作模式并没有解决高启动成本的问题，但来自移动基站的可靠电力需求提供了一个坚实的商业案例，可以吸引投资和长期研究资金。

6.2 普遍服务基金

传统上，普遍服务基金用于激励电信公司将电信业务扩展到偏远地区⁴³。目前，为目标社区的社区电力项目提供资金并不属于这一范畴。有必要实现基金多样化，包括社区电力项目初始阶段的融资，作为促进这些离网社区使用电信业务的一种手段。

对最不发达国家电力系统进行建议的大规模扩展和升级，将面临资金方面的重大挑战，而这一切被认为是到2030年实现普遍接入的必要条件。

与其他生产过程一样，发电、输电和配电都会产生固定和可变成本。在收回成本之前，电力行业面临大量前期投资。特别是，输电和配电网络涉及大量的固定成本。

风能和太阳能等非水力可再生能源发电技术的固定成本也很高，但它们比大规模集中式化石燃料发电厂或可再生能源来源低得多。

最不发达国家电力行业常见的评估风险是消费者支付能力低；缺乏指导私营部门参与的框架；以及认知上受社会授权和政治不确定性影响的来自垄断性公用事业的监管风险。

2012年至2014年期间，中等收入国家在通过担保、银团贷款和股票筹集的资金份额占72.3%，最不发达国家占8%，其他低收入国家占2%。非洲发展中国家（29.1%）受益最大，其次是亚洲发展中国家（27.2%）和美洲发展中国家（21.1%）（OECD, 2016a）。

现收现付制

现收现付（PAYG）提供商可以采取两种方法之一，通过消费者为系统融资。

- 无限期的服务费，在这种情况下，消费者永远不会拥有系统本身，而只是付费使用。这种做法的基础是，消费者只在需要电力并且能够以可承受的价格获得电力时付费，通常是按天、按周或按月付费（类似于典型的融资安排）。
- 消费者在付清主要的系统费用后，最终将拥有该系统，消费者必须进行分批支付。

⁴² Taverner, David (2010年) 社区电力：使用移动技术扩展电网。移动网络绿色能源项目。GSMA, 伦敦。第80页。

⁴³ Dorward, Lynne A. (2013年)：普遍服务基金和全民数字包容性。国际电信联盟，日内瓦。第142页。

M-KOPA案例

M-KOPA太阳能公司是一家经常被引用的示例，拥有成功应用现收现付（PAYG）模式的良好经验。在肯尼亚、坦桑尼亚和乌干达，已经有超过33万户家庭接入了太阳能发电，每天新增500多户家庭接入（《经济学人》，2016年）。

6.3 外部融资

目前，社区电力项目的主要资金来自外部资金，主要来自非洲开发银行、世界银行和经合组织-发展援助委员会等多边组织的官方发展资金，以及私人投资者的资金。多边组织正越来越多地合作，寻找更多的创新方法来抵消与这些项目相关的高风险和低成本，以鼓励私人投资者的参与。这些组织因此建立了许多平台，以促进银行可担保的绿色能源项目的发展，并将投资者与这些项目联系起来。这些平台中的大多数也影响着第三世界国家的能源政策，特别是因为政策是投资者在决定是否在某些国家投资时提到的主要因素之一。一些融资平台概述如下。

6.3.1 碳销售

1997年签署⁴⁴并于2005年生效的《京都议定书》为所有签约国设定了温室气体排放上限。目标是加快清洁技术的发展，扭转全球变暖的趋势。因此，《京都议定书》建立了一个机制，以奖励开发清洁技术的努力⁴⁵。在减少温室气体排放至可接受水平方面进展缓慢的国家（即这些国家内的项目）可以购买碳信用额度，以抵消他们所产生的超额排放（以公吨二氧化碳当量计算）。这些碳信用额度由排放量低于其分配排放上限的国家（即这些国家内的项目）发放。碳交易受到高度监管，并涉及第三方的几个核查步骤。

6.3.2 清洁发展机制（CDM）

CDM是根据《京都议定书》建立的平台，用于发展中世界基于项目的减排量的碳信用签发。这些信用额被称为核证减排量（CER），出售给工业化国家，工业化国家购买这些信用额以实现其减排目标。交易由适应基金理事会（AFB）监督和管理。

CDM项目周期由七个步骤组成，所有这些步骤都由单独的规则和参考资料规范。这些步骤包括：(1) 项目参与方进行项目设计，(2) 指定国家主管机构的项目国家批准，(3) 指定经营实体的项目审定，(4) CDM执行理事会进行项目登记，(5) 逐项监督项目参与方，(6) 指定经营实体核查项目，(7) CDM执行理事会签发CER。

新的CDM监管框架于2017年6月1日生效，概述如下。

⁴⁴ 联合国（1997年）：《联合国气候变化框架公约》京都议定书。联合国，纽约。第192页。

⁴⁵ UNFCCC（2007年）：京都议定书机制。《联合国气候变化框架公约》。第6页。

资金来源	合格项目	限制条件	影响
CDM	<ul style="list-style-type: none"> - 水电、风能、太阳能、地热和生物质能项目 - 节能家用设备项目 	<ul style="list-style-type: none"> - 核能项目 - 水力发电项目的装机容量不得超过20 MW（某些条件下除外） - 适用于已核准《京都议定书》的国家 - 将于2020年停止执行，并由《巴黎协定》条款取代 	<ul style="list-style-type: none"> - 迄今已注册的项目超过8 409个。 <ul style="list-style-type: none"> • 拉丁美洲1 097个 • 亚太6 877个 • 欧洲和中亚84个 • 非洲241个 • 中东110个
主要参考（包括预期资金建模的政策框架和方法）。			
<ul style="list-style-type: none"> - https://cdm.unfccc.int/Projects/diagram.html - http://climateneutralnow.org/Pages/Home.aspx 			

6.3.3 非洲碳信用交易所（ACCE）

ACCE是赞比亚政府正在建立的一个碳交易所，是整个非洲个人和企业为绿色项目筹集资金的平台。ACCE是全球已经运作的几个碳交易所之一。

资金来源	合格项目	限制条件	影响
非洲碳信用交易所	所有位于非洲的绿色项目	不提供给非洲以外的项目	尚未运行
主要参考			
<ul style="list-style-type: none"> - http://www.africacce.com/ - https://www.daily-mail.co.zm/carbon-credit-exchange-set/ 			

6.3.4 碳交易所（CTX）

CTX是一家总部位于伦敦的碳交易所，在全球范围内运营。它归全球环境市场（GEM）所有。CTX与许多环境商品注册机构对接，并与金融中介机构建立了电子联系，以提高交易效率和透明度。

资金来源	合格项目	限制条件	影响
碳交易所	全球绿色项目	未提及任何限制	世界上第一个也是最大的电子碳交易交易所
主要参考			
<ul style="list-style-type: none"> - http://ctxglobal.com/ - http://www.gemglobal.com/ 			

6.3.5 非洲可再生能源基金（AREF）

AREF是一家泛非私募股权基金，专注于支持撒哈拉以南非洲的中小型独立发电商。该基金于2014年启动，拥有2亿美元的承诺资本。总部设在肯尼亚的内罗毕，主要由非洲开发银行（AfDB）赞助。其他主要赞助商包括非洲可持续能源（SEFA）。

资金来源	合格项目	援助类型	影响
AREF 其他合作伙伴包括： 非洲可持续能源基金（SEFA）、非洲开发银行（AfDB）、非洲生物燃料和可再生能源公司（ABREC）、西非经共体投资与发展银行（EBID）、西非开发银行（BOAD）、荷兰开发银行（FMO）、卡尔弗特基金会（Calvert Foundation）、CNUCED、BIDC、伯克利能源非洲有限公司、全球环境基金（GEF）、丹麦国际开发署（DANIDA）、美国国际开发署（USAID）	<ul style="list-style-type: none"> 来自太阳能、风能、生物质能、水力以及一些地热和闲置天然气技术的中/小型独立发电项目 	<ul style="list-style-type: none"> 股权融资 工程支持 管理支持 	<ul style="list-style-type: none"> 每个项目承诺1 000万至3 000万美元的股权资本。
		主要参考	限制条件
		<ul style="list-style-type: none"> http://www.berkeley-energy.com/index.jsp#home 	<ul style="list-style-type: none"> 项目功率输入范围必须在5至50 MW之间 不支持南非的项目

6.3.6 电力非洲，超越电网

“电力非洲”是一项由美国政府主导的倡议，重点关注撒哈拉以南非洲地区离网和小规模能源解决方案的投资和增长领域。该组织与40多位投资者和从业者合作，筹集了超过10亿美元的承诺资金，致力于实现创新的解决方案。电力非洲还与非洲各国政府合作，确保监管环境支持私营提供的离网选择。到目前为止，“电力非洲”已经生成了一份13个早期项目准备设施的清单，这些设施在撒哈拉以南非洲的能源行业运行。

资金来源	合格项目	援助类型		影响
非洲电力 – 美国政府主导的伙伴关系 其他合作伙伴包括：AfDB、ATI、加拿大、南部非洲开发银行（DBSA）、英国国际开发署（UK Aid）、法国、欧盟、IDC、IRENA、以色列、日本、非洲发展新伙伴关系（NEPAD）、挪威、SE4All、瑞典、世界银行	<ul style="list-style-type: none"> – 水电、风能、太阳能、地热和生物质能项目 – 节能家用设备项目 	<ul style="list-style-type: none"> – 补助资金 – 债务融资 – 股权 – 夹层融资 – 保险 – 担保 – 早期阶段风险资本 	<ul style="list-style-type: none"> – 项目准备 – 项目开发支持 – 技术援助 – 法律援助 – 技术/科学研究 – 市场研究 	<ul style="list-style-type: none"> – 已经承诺超过540亿美元。 – 支持超过14个撒哈拉以南非洲国家的130个私营部门合作伙伴。 – 其中40个私营部门合作伙伴专注于在农村和城市周边地区发展迷你电网和分布式电力服务和基础设施。
主要参考				
<ul style="list-style-type: none"> – https://www.usaid.gov/powerafrica/beyondthegrid – https://www.usaid.gov/powerafrica/toolbox 				

6.3.7 非洲可持续能源基金（SEFA）

SEFA是一个由非洲开发银行组织、由丹麦、意大利、英国和美国政府资助的9 500万美元的多方捐助基金。它支持非洲的可持续能源议程。SEFA的运作方式是发放补助促进银行可担保项目的筹备，通过AREF对这些项目进行股权投资，并支持公共部门机构改善有利于私营部门投资的环境。它与联合国“人人享有可持续能源”（SE4All）倡议保持一致。他们共同经营绿色迷你电网服务台，为非洲绿色迷你电网（GMG）开发商提供完整的信息服务。

资金来源	合格项目	援助类型		影响
SEFA 合作伙伴包括：AfDB和SE4All	<ul style="list-style-type: none"> – 非洲绿色迷你电网项目 – 项目必须以3 000万至2亿美元的资本投资为目标 	<ul style="list-style-type: none"> – 成本分摊的补助资金，促进投资前活动（从前期可行性到财务收尾） – 投资前阶段的技术援助 – 通过AREF进行股权投资 – 帮助政府创造有利于私人投资的环境（法律、监管和政策制度） 		<ul style="list-style-type: none"> – AREF倡议的主要贡献者之一。
主要参考				
<ul style="list-style-type: none"> – https://www.afdb.org/en/topics-and-sectors/initiatives-partnerships/sustainable-energy-fund-for-africa/ – https://www.se4all-africa.org/se4all-in-africa/financing-opportunities/sustainable-energy-fund-for-africa/ – http://greenminigrid.se4all-africa.org/ 				

6.3.8 欧佩克国际发展基金（OFID）

OFID是石油输出国组织（OPEC）成员国于1976年建立的开发金融机构，作为向发展中国家提供援助的一个渠道。OFID“贫困人口能源倡议”由欧佩克部长理事会认捐的10亿美元循环捐款资助，旨在寻求可行的解决方案，使发展中国家的农村贫困人口普遍获得清洁能源。2016年，该倡议共作出了4.12亿美元的新承诺。其中一半以上是通过私营部门批准的，用于在非洲建造发电厂，包括光伏和水力发电设施。

资金来源	合格项目	援助类型	影响
OFID 合作伙伴包括：SE4All、能源行业	<ul style="list-style-type: none"> - 发展中国家的所有能源项目 	<ul style="list-style-type: none"> - 提供基础设施和设备 - 研究和能力建设 - 为小规模可再生能源计划提供补助 	<ul style="list-style-type: none"> - 迄今为止，支持的项目遍布90个发展中国家
		主要参考	限制
		<ul style="list-style-type: none"> - http://www.ofid.org/FOCUS-AREAS/Energy 	<ul style="list-style-type: none"> - 不支持在尼日利亚和科特迪瓦的项目。

6.3.9 国际可再生能源机构（IRENA）

IRENA项目融资机制是为发展中国家可再生能源项目提供资金的融资机制。它提供优惠贷款，在七个供资周期内分配，以支持IRENA向阿布扎比发展基金（ADFD）推荐的发展中国家可再生能源项目。政府、半政府、私营或非政府实体均可提交申请，但必须得到项目所在国政府的支持和优先考虑。

资金来源	合格项目	援助类型	影响
IRENA 合作伙伴包括：SE4All、能源行业	<ul style="list-style-type: none"> - 项目必须在IRENA的成员国实施 - 项目必须使用可再生能源 - 项目必须已超越可行性和实施前的阶段 - 项目必须在完整项目建议阶段进行全面的可行性和经济分析 	<ul style="list-style-type: none"> - 每个项目的债务融资额为500-1 500万美元 	<ul style="list-style-type: none"> - 迄今为止，支持的项目遍布90个发展中国家
		主要参考	限制条件
		<ul style="list-style-type: none"> - http://www.ofid.org/FOCUS-AREAS/Energy 	<ul style="list-style-type: none"> - 所有的申请都应该有政府担保书的支持，担保书由负责处理国际合作和借贷事务的部委或主管部门签发。

6.3.10 可再生能源和能源效率伙伴关系（REEEP）

REEEP是一个设在维也纳的国际多边伙伴关系加速器，致力于在发展中国家部署可再生能源和能源效率系统。REEEP投资于可靠的、负担得起的和安全的分布式电力解决方

案，用于离网小规模家庭（独立太阳能照明和电源），以及电网连接不可靠或无电网连接的社区中的微电网和迷你电网应用。由REEEP共同主办的私人融资咨询网络（PFAN）为参与公司提供商业和战略指导，并为投资者牵线搭桥，帮助项目从捐助方过渡到私人融资。REEEP密切关注此类项目，使用监测、评估和学习框架，帮助捕捉、处理和应对项目中出现的经验，并产生基于证据的情报，以进一步发展和复制有前途的模式。获取这些知识是减少企业、投资者和公共部门利益攸关方参与市场的风险的基本步骤。REEEP还采用了多层次的方法来分享知识，首先是与通过制定政策和形成投资渠道充分利用证据的密切合作伙伴直接合作。该组织主办了一个气候知识经纪人的新兴联盟，称为气候知识经纪人集团，REEEP是该集团的主要成员。

资金来源	合格项目	援助类型	影响
<p>REEEP</p> <p>其他合作伙伴包括：联合国工发组织（UNIDO）、IRENA、瑞典国际发展合作署（Sida）、奥地利、蓝月亮基金、CDKN、德国、德国国际合作机构、挪威、OFID、瑞士、英国、CEC、欧洲绝热材料制造者协会（EURIMA）、欧盟、澳大利亚、加拿大、爱尔兰、意大利、新西兰、西班牙、荷兰、美国、北美绝热材料制造者协会（NAIMA）、洛克菲勒基金会</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 技术上可行 - 商业上可行 - 减少温室气体排放 - 对发展有益 - 拥有合格的管理团队 - 具备增长潜力 	<ul style="list-style-type: none"> - 项目开发支持 - 项目结构设计（包括财务结构设计） - 为可行性和技术研究提供资金 - 补助融资 - 债务融资 - 股权融资 - 用于政策制定和形成投资渠道的协作性知识共享技术 - 高效和高性能的知识管理系统 - 夹层融资 - 保险 - 担保 - 早期风险资本 	<ul style="list-style-type: none"> - 已为87个项目完成融资超过12亿美元 - 电力非洲项目：赞比亚超越电网基金 - 投资2 500万美元，为100万赞比亚人带来清洁能源解决方案
		主要参考	限制条件
		<ul style="list-style-type: none"> - https://www.reeep.org/ - https://www.bgfz.org/ - http://pfan.net/ - http://www.reegle.info/ - https://www.climateknowledgebroskers.net/ - https://www.climatetagger.net/ 	<ul style="list-style-type: none"> - 不接受项目征集之外的自提方案。

6.3.11 英国国际发展部（DFID）影响力基金

DFID影响力计划旨在促进撒哈拉以南非洲和南亚的影响力投资市场，通过改善获得负担得起的商品和服务的机会以及在金字塔底层创造创收机会，激励对造福贫困和低收入人群的企业进行投资。该计划有两个核心组成部分：由CDC管理的两个投资工具和一系列的市场建设活动。该计划于2012年启动，DFID计划在16年内为此提供高达1.97亿英镑的资金。社会影响力投资涵盖了广泛的社会和环境问题，涉及不同的投资者和中介机构。从短期来看，该基金将通过对被投资方的财务回报和发展影响力进行稳健的尽职调查，给予共同投资者信心，并在必要时向私人投资者提供有限的潜在从属关系，促进他们的参与，从而促进资本增加。从长远来看，该基金旨在通过证明扶贫商业模式在财务上的可行性，并证明这类投资将带来的积极影响，从而推动更多的资本。DFID的影响力计划旨在促进撒哈拉以南非洲和南亚的影响力投资市场。作为该计划的一部分，DFID已经启动了一个4 000万英镑的影响力加速基金。该基金由CDC管理，旨在通过创造直接和间接的就业机会，以及增加获得基本商品和服务的机会，特别是在偏远地区或脆弱国家，创造经济机会和就业。高影响力投资战略集中在两个具体领域：(1) 帮助企业采取原本不会进行的、与其核心业务有关的高发展影响力措施，例如进入一个非常困难的新地域，或开发一种价格明显较低的产品，以便让较贫困的消费者，特别是妇女和女孩获得商品和服务；(2) 帮助处于挑战性地域的企业在其主流投资附近建立绿地或棕地公司，提供对其业务至关重要的基本商品和服务，如住房、医疗保健和交通。

资金来源	合格项目	援助类型	影响
DFID影响力基金 其他合作伙伴包括：CDC集团等	<ul style="list-style-type: none"> - 重点关注低收入社区的扶贫项目 - 项目必须具有示范意义的社会影响力和财务可行性 	<ul style="list-style-type: none"> - 稳健的尽职调查 - 500-1 500万美元股权融资 - 项目多样化 	<ul style="list-style-type: none"> - 该基金支持非洲的七家能源公司。 - 基金的目标是向撒哈拉以南非洲和南亚的100多家企业提供资金。
		主要参考	限制条件
		<ul style="list-style-type: none"> - http://www.theimpactprogramme.org.uk/investments-dfid-impact-fund/ 	<ul style="list-style-type: none"> - 不资助可以通过小额融资支持的项目。 - 该基金还有11年的时间完成其使命。

6.3.12 可持续能源促进经济发展（SEED）倡议

SEED是美国落基山研究所的一项倡议，它与撒哈拉以南非洲的政府、公用事业部门、发展伙伴和私营部门能源开发商合作，推动负担得起的、高效的全系统能源方案，其中包括新兴分布式可再生技术，并迅速向无电人口提供能源。

资金来源	合格项目	援助类型	影响
可持续能源促进经济发展（SEED） 其他合作伙伴包括：维珍联合（Virgin Unite）、洛克菲勒基金会	<ul style="list-style-type: none"> - 水电、风能、太阳能、地热和生物质能项目 - 节能家用设备项目 	<ul style="list-style-type: none"> - 技术、政策和财务咨询 - 参与项目的实施 	<ul style="list-style-type: none"> - 与卢旺达合作，为更有效的能源管理进行能力和战略建设，在能源方面短期内实现2 000万美元，长期内实现10亿美元的节省，并将农村地区的并网和离网电力接入率从22%提高到70%。 - 目前在塞拉利昂和乌干达开展工作。

(续)

资金来源	合格项目	援助类型	影响
		主要参考	
		- https://www.rmi.org/our-work/global-energy-transitions/seed/	

6.3.13 可再生能源绩效平台 (REPP)

REPP支持整个撒哈拉以南非洲25 MW以下的中小型可再生能源项目。该倡议由联合国环境规划署 (UNEP) 和欧洲投资银行 (EIB) 制定，通过支持可再生能源项目在撒哈拉以南非洲实现联合国SE4All目标。广泛的可再生能源技术均有资格获得支持，包括风能、太阳能光伏、地热、废弃物资源化 (垃圾填埋气和热废物资源化)、径流式水力发电、生物质和沼气。REPP通过国际气候基金从英国商业、能源和工业战略部获得了4 800万英镑的初始资金。REPP同时支持并网和离网项目。如果符合REPP的资格标准，它也考虑由私人开发商开发的项目。

资金来源	合格项目	援助类型	影响
REPP 合作伙伴包括：能源和气候变化部、联合国环境署和欧洲投资银行	<ul style="list-style-type: none"> - 可再生能源项目。 - 项目发电量必须在1至25 MW之间。 - 项目必须至少在以下国家中的一个国家实施：贝宁、布基纳法索、科特迪瓦、埃塞俄比亚、加纳、肯尼亚、利比里亚、马达加斯加、马拉维、马里、莫桑比克、尼日利亚、卢旺达、塞内加尔、塞拉利昂、坦桑尼亚、多哥和津巴布韦。 - 项目开发商必须遵循REPP环境和社会政策和程序。 	<ul style="list-style-type: none"> - 技术援助 - 促进获得风险缓解工具和REPP合作伙伴股权融资提供的长期贷款 - 为财务健全的项目提供基于结果的财政支持。基于结果的财政支持可以采取入网电价补贴或其他适当工具的形式。 	<ul style="list-style-type: none"> - 该基金支持非洲的七家能源公司。 - 旨在向撒哈拉以南非洲和南亚的100多家企业提供资金。
		主要参考	限制条件
		- https://www.repp-africa.org/africa.org/	<ul style="list-style-type: none"> - 在任何一个符合条件的国家最多只能资助五个项目。 - 获得REPP资助的项目预计不会通过CDM或任何其他正式碳市场机制从碳信用额中获得更多收入。

6.3.14 融资方案类别概述

下表总结了上文讨论的不同融资方案。

	融资平台	类别
1.	普遍服务基金（USF）*	政府、国际机构
2.	碳信用交易	
a)	CDM	国际机构
b)	非洲碳信用交易所（ACCE）	政府
c)	碳交易所（CTX）	私营
3.	非洲可再生能源基金（AREF）	私营，国际机构
4.	电力非洲，超越电网	政府，国际机构
5.	SEFA	国际机构
6.	OFID	国际机构
7.	IRENA	国际机构
8.	REEEP	政府，国际机构
9.	DFID影响力基金	政府机构
10.	SEED	私营
11.	REPP	政府、国际机构

* 目前只为电信运营商提供资金，没有规定为社区电力项目提供资金。

6.3.15 宽带基础设施融资最大限度地降低私人投资者的风险

在人口密度低的农村地区，供应商不敢投资电信项目，因为建设宽带基础设施的费用很高，需要很长时间才能收回投资，而且来自小客户群的回报被认为没有吸引力。资助机构可以建立融资机制，激励私营部门在服务不足的农村社区投资建设开放接入的宽带数字网络。

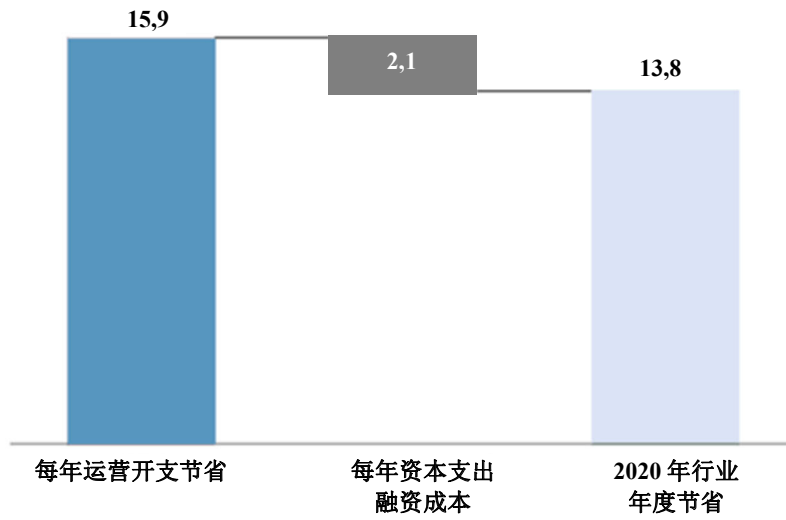
这类开放接入宽带基础设施项目可以包括开发离网可再生电力迷你电网，或者与当地能源生产商合作，为电信站点以及附近偏远的农村社区供电。

一个典型的例子是连接欧洲设施（CEF）基金，这是欧洲投资银行和[欧盟委员会连接欧洲设施计划](#)之间的合作，向投资者提供激励措施，鼓励投资者为宽带网络提供资金，以便在欧洲人口稀少、服务不足的农村和偏远地区扩展高速数字互联网服务。

6.3.16 电信和能源携手促进可持续发展

在电网可用性差和安装离网设施的地区，许多基站仍然由柴油发电机供电。然而，创新的可再生技术和混合能源供应方法正越来越多地得到应用。根据GSMA（2014年）的研究，这些系统可以为电信运营商每年节省大量成本（见图33）。

图33：行业向绿色能源解决方案过渡每年节省的成本（单位：10亿美元）



来源：GSMA，2014年

7 政策机制和建议

7.1 引言

可再生能源政策必须越来越多地纳入国家能源部门的整体规划和战略框架，涵盖整个可再生能源开发和实施周期。政策制定机构应确定长期战略和目标，调整政策和法规，同时促进脱碳化的能源环境。能源和环境部门的政策应该协调一致。

IRENA建议，这应包括“确定政策设计的最佳做法和趋势，评估支撑机制及其对不断变化的市场条件的适应性”。

要将宽带业务扩展到农村地区，就必须在农村地区发展和大幅扩展电力接入。各国政府必须创造一个鼓励私营部门参与的有利环境。为了促进这一点，需要建立强有力的政策和监管环境，以减少投资风险，提高可行性，特别是增加离网能源行业的整体吸引力。

传统能源政策

从全球来看，发展中国家的数字经济正以每年15%至25%的惊人速度增长⁴⁶。然而，仍有10亿人生活在电网之外，无法享受这种数字发展带来的好处，因为他们没有电接入互联网。因此，将数字服务扩展到这些离网社区的努力必须与电力基础设施的扩展齐头并进。由于现有大型电力运营商往往不愿意将其服务扩展到低收入和人口稀少的偏远地区，因此有必要建立政策支持机制，以促进小型、创新型电力运营商的介入。令人鼓舞的是，截至2016年，发展中国家已经颁布了促进可再生能源项目投资的政策，旨在扩大离网社区的电力接入⁴⁷。这些政策包括：

可再生能源组合标准（RPS）：这是一项法规，规定电力公司有义务利用可再生能源中生产一定比例的电力。能源生产商从可再生能源生产的每单位电力中获得证书。该证书与电力一起出售给供电公司，然后由供电公司转交给监管机构，以证明他们遵守了规定。

财政激励：一些国家正在通过补助、贷款或税收激励措施提供公共资金，以鼓励对可再生能源的投资。例如，印度为太阳能光伏屋顶系统提供30%的资本补贴。

入网电价（FIT）-针对并网系统。这是对可再生能源公司最常见的监管政策支持。它旨在根据每种技术的发电成本，向可再生能源生产商提供长期合同。电力公司被授予更高的每千瓦时价格，以反映电力生产成本。近年来，一些国家修订了该政策，以支持较小规模的项目。

⁴⁶ Bock, W.、Vasishth, N.、Wilms, M.和Mohan, M.（2015年）：数字经济基础设施需求。波士顿咨询集团。<https://www.bcg.com/publications/2015/infrastructure-needs-of-the-digital-economy.aspx>。

⁴⁷ Hsu, H.、Rosengarten, C.、Weinfurter, A.、Xie, Y.、Musolino, E和Murdock阁下（2017年）：发展中国家可再生能源和能源效率：对减少全球排放的贡献。十亿吨联盟。第90页。

新的商业模式和政策的作用

有利的能源政策考虑

离网可再生能源解决方案的最大挑战是缺乏资金。缺乏资金的原因是这些项目的盈亏平衡期长，回报低。因此，政策需要解决这个问题。目前正在努力通过补助、贷款和对投资者的税收激励措施来增加公共资金。需要做更多的工作来鼓励私人投资。

一般性政策：政策应该为提供能源效率和可再生能源供应、储存、数字应用方面的投资创造有利环境。

- 公共和私营部门必须在能源转型方面密切合作。
- 为可再生能源创造公平的竞争环境（如化石燃料补贴改革，碳定价政策）。
- 制定确保技术和网络可靠性的标准（如质量和技术标准、证书）。
- 建立由多边机构支持的担保机制，代表资金和债务能力有限的政府，以降低私营部门的风险，吸引更多投资。

金融政策：银行需要政策工具向这些项目发放可靠的长期贷款。通过适当的政策和监管框架，政策制定机构可以通过确定反映项目成本结构的适当费率结构，包括精心设计的获得和持有许可、执照和特许权的程序来降低项目的经济风险。还可以免除低收入群体的电器进口关税和能源相关服务的增值税。

- a) 能源效率政策：能源效率提升措施在减少人均能源消耗和扩大电力接入方面非常有效。这会带来较低的电力成本和较少的能源浪费。有效的能源效率做法可以极大地改善可再生能源项目的经济性。
- b) 能源价格：电价也应反映出可再生能源发电的成本和独特性，法规应允许根据使用时间的不同，在电价上有所变化。

7.2 数字政策

- a) 数字网络部署的传统方法是基于每个运营商构建自己专有的基础设施。在以农村和偏远地区为主的地区，传统方法效率不高，移动运营商一直在积极、成功地寻找共享基础设施投资的方法，以扩大网络覆盖范围，同时保持业务提供方面的良性竞争。基础设施共享模式可以提高向农村和偏远地区扩展网络的经济性。运营商可以将其资本和投资成本降低50%至70%⁴⁸。
- b) 移动运营商也在将其通信铁塔剥离给铁塔运营商，作为一种节约成本的策略。

⁴⁸ GSMA（2016年），释放农村覆盖的潜力：商业上可持续移动网络扩展的促成因素。互联社会。https://www.gsma.com/mobilefordevelopment/wpcontent/uploads/2016/07/Unlocking-Rural-Coverage-enablers-for-commercially-sustainable-mobile-network-expansion_English.pdf

7.3 数字政策考虑

- a) 部署公共骨干网络，以渗透到农村地区并到达偏远地区。
- b) 通过部署多点固定无线接入或新一代4G和5G移动技术，实现农村地区的聚合。
- c) 通过补贴农村宽带网络供应商，降低转接成本。
- d) 引入无线电频谱划分的创新方法，降低实施无线网络的成本，方法是通过简化和降低获取农村频谱许可证的高成本，允许在合作的基础上共用或指配频谱，同时遵守国际电联《无线电规则》中规定的权利和义务。
- e) 营造适合的监管环境，促进数字创新，如更智能的能源系统、人工智能使用、物联网。
- f) 独立解决方案（如PAYG、后付费服务和电池充电）和迷你电网（如公私合营方式）的新模式。

“[过渡时期可再生能源政策](#)”报告（IRENA、IEA、REN21）⁴⁹指出了关键障碍，并强调了促进可再生能源部署的政策选择，重点关注直接支持、整合和有利环境。

表7提出了跟踪与发展目标相关的关键行业政策机制的分类。

⁴⁹ IRENA、IEA、REN21 <https://www.irena.org/publications/2018/Apr/Renewable-energy-policies-in-a-time-of-transition>

表7：政策分类

实现能源转型的政策		在一般背景下，可再生能源的部署（安装和发电）	在接入背景下，可再生能源的部署（安装和发电）（包括能源服务）	利用可再生能源最大程度地实现经济社会发展
直接政策	推动	<ul style="list-style-type: none"> - 使用可再生能源的约束性目标 - 电力配额和义务 - 建筑法规 - 授权（如太阳能热水器、区域供热中的可再生能源） - 混合授权 	<ul style="list-style-type: none"> - 农村电气化的目标、战略、计划 - 清洁炊事战略、计划 - 沼气池计划 	旨在实现利益最大化和确保可持续过渡（如社区、性别）的部署政策，包括为有助于实现社会经济目标的设施和要求、优惠待遇和提供的财政激励
	拉动	<ul style="list-style-type: none"> - 监管和定价政策（如入网电价和溢价，拍卖） - 可交易的证书 - 自用工具（如净收费和净计量） - 支持自愿方案的措施 	<ul style="list-style-type: none"> - 监管和定价政策（如法律规定、价格/资费监管） 	
	财政和金融	<ul style="list-style-type: none"> - 税收优惠（如投资和生 产税收抵免、加速折旧、减税） - 补贴 - 补助 	<ul style="list-style-type: none"> - 税收激励（如减免） - 补贴 - 补助 - 优惠融资 - 对金融机构的支持 	
整合政策		<ul style="list-style-type: none"> - 增强系统灵活性的措施（如提高资源的灵活性，如存储、可调度的供应、负荷整形等）。 	<ul style="list-style-type: none"> - 离网系统与主电网融合的政策 - 迷你电网和智能分布式能源系统的政策 - 将可再生能源政策与高效电器和能源服务相结合 	
		<ul style="list-style-type: none"> - 确保具备所需基础设施的政策（如输电和配电网络、电动汽车充电站、区域供热基础设施、道路通行） - 行业联合的政策 - 对技术发展的研发和部署（RD&D）支持（如储能） 		
		<ul style="list-style-type: none"> - 更好地协调能源效率和可再生能源政策 - 将脱碳化目标纳入国家能源计划 - 调整社会经济结构应对能源转型的措施 		

表7：政策分类（续）

实现能源转型的政策	在一般背景下，可再生能源的部署（安装和发电）	在接入背景下，可再生能源的部署（安装和发电）（包括能源服务）	利用可再生能源最大程度地实现经济社会发展
扶持政策	<ul style="list-style-type: none"> - 公平竞争的政策（如化石燃料补贴改革、碳定价政策等） - 调整能源市场设计的措施（如灵活的短期交易，长期价格信号） - 确保技术可靠性的政策（如质量和技术标准，证书） 	<ul style="list-style-type: none"> - 产业政策（如利用当地能力） - 贸易政策（如贸易协定、出口促进） - 环境和气候政策（如环境法规） 	
		<ul style="list-style-type: none"> - 国家可再生能源政策（如总体目标、具体目标） - 便利所有利益攸关方获得负担得起的融资的政策 - 教育政策（如将可再生能源纳入课程，根据实际和所需技能的评估协调教育和培训） - 劳动力政策（例如，劳动力市场政策、培训和再培训计划） 	
		<ul style="list-style-type: none"> - 土地使用政策 - 研发和创新政策（如补助和基金、伙伴关系、促进创业、产业集群的形成） - 城市政策（如针对燃料使用的地方性规定） - 公共卫生政策 	
整合和扶持政策	<ul style="list-style-type: none"> - 支持性的治理和体制结构（如简化许可程序，可再生能源、专门机构） - 关于能源转型的重要性和紧迫性的宣传计划，旨在提高认识和改变行为 - 应对混乱情况的社会保护政策 - 综合资源管理的措施（如能源、食品和水的关系） 		

来源：IRENA，2018年4月 <https://www.irena.org/publications/2018/Apr/Renewable-energy-policies-in-a-time-of-transition>

7.4 迷你电网运营政策建议

迷你电网运营商模式描述了迷你电网实施和运营的组织结构，具体确定谁拥有发电和配电资产，谁运营维护系统。

可以考虑四种主要的迷你电网运营商模式：

- 公用事业
- 私营部门
- 社区
- 混合型。

每种模式的成功实施都取决于其独特的背景：

- a) 自然环境（如地理、能源资源和气候/天气条件），
- b) 当地的社会经济环境，
- c) 政策和监管环境。

适当的监管措施必须允许私营部门生产（发电）并向公共电力分销机构或通过迷你电网直接向最终用户销售电力（配电）。

7.5 具体的离网政策

实现普遍接入所需的大部分新增电力将涉及私人或公用事业运营商拥有的微电网和迷你电网离网网络，或者是发展中国家农村地区由社区拥有的离网网络。这些离网解决方案不太可能并入主电网，很可能会继续自主运行。可能有理由将较大的社区方案纳入由负责能源生产和供应的现有电力公司出资或管理的国家电网。大多数国家对电网供电进行补贴。因此，离网电源无法与分布式电网的电价竞争。

政策考虑：

鉴于分散的脱碳电源在弥合偏远地区电力缺口方面的关键作用，离网解决方案和私营部门参与方的政策和筹资机制至关重要。

离网运营商将不得不应对未来国家电网到来的潜在风险，这可能会给迷你电网的长期可行性带来重大不确定性。与主电网到达相关的政策必须控制主电网到达的方式和时间，并减轻离网和迷你电网运营商面临的风险。

应允许私营迷你电网开发商、运营商和投资者收回可持续运营的成本，并给予他们合理的时间和适当的利润率。⁵⁰

电力接入可以增强人民和当地社区的权能，增加他们的收入和生产力，增加他们获得医疗保健、水和教育的机会，并改善他们的整体社会经济福祉。获得普遍的能源服务和宽带数字服务对于实现2030年的可持续发展目标至关重要。

⁵⁰ https://www.academia.edu/38089928/Renewable_Energy_Policies_in_a_Time_of_Transition?auto=download

8 结论

连接是能源密集型的。没有电力，尤其是负担得起、可靠和可扩展的电力来源，连通性就无法发展。毫无疑问，连接性和电力不足往往出现在同一地点。

由于围绕清洁能源的技术创新，正在打破电力生产和分配格局，观察到以下趋势：脱碳化、数字化和分散化。

可再生能源与储能和节能软件相结合，是支持偏远地区获得可靠和负担得起的连接的关键。

此外，获取电力和连接等基本服务可以而且必须通过联合或共享基础设施来解决，以最大限度地降低投资和运营成本，同时加快实现多个可持续发展目标的进度。

连接下一个十亿人不仅需要技术创新，还需要商业模式和融资创新。与第四次工业革命的任何其他方面一样，社会和经济的发展只能通过可扩展、可复制的模式来实现，而这些模式是由适用于经济和社会各个方面的平台革命所激发的。

正是通过共享经济，无论是在私营部门参与者之间，还是在公私伙伴关系中，才能有效地解决获取电力和连接的问题。来自发展和国际组织的资金支持可以吸引私营部门对资本密集型基础设施的投资，而这些基础设施是弥合数字鸿沟和电力接入的关键，为社会经济发展的高效率用开辟了多种机会，包括获取数字服务。

9 附件和案例研究

9.1 能源服务公司

分布式电力市场对于快速推进非洲清洁电力解决方案的部署非常重要，为电信铁塔运营商行业提供可靠、负担得起的清洁电力服务。

日益增长的市场

2010年至2015年期间，非洲新增手机用户数量年均增长率超过12%，非洲移动网络的规模预计将从2014年的240 000个铁塔增长到2020年的325 000个铁塔。移动网络运营商（MNO）位于非洲快速增长的移动经济的核心，其中包括电子商务和移动电子商务、移动货币、移动银行以及电子卫生、电子政务和电子农业等其他增值业务。

然而，随着移动运营商向人口稀少的农村地区发展，由于缺乏电网供电和高燃料成本，每用户平均收入（ARPU）下降，能源成本增加。能源成本可能达到移动网络运营商基础设施运营支出（OPEX）的60%，这抑制了在农村地区大规模部署移动覆盖。随着最近太阳能光伏和储能技术的价格下降，太阳能和混合电力解决方案变得越来越有竞争力，可以为移动网络运营商和铁塔运营公司提供更可靠和更具成本效益的电力供应。

但在快速发展和激烈竞争的环境中，移动网络运营商专注于服务客户和投资有源基础设施（即无线电设备），而不是在清洁能源解决方案上投入时间和资源。在一个不断发展的铁塔能源环境中，需要特定的技术专长，移动网络运营商在推动能源效率方面并不处于理想的位置。此外，随着ARPU的下降，移动网络运营商将优先考虑网络扩张和有源设备的技术升级。由于资金有限，他们倾向于投资有源无线电设备而不是投资能源解决方案。绿色和可再生能源解决方案的成本节约潜力尚未开发，特别是因为它们预期投资回收期最长为四年。能源服务公司（ESCO）更适合投资于长期资产，并在一段时间内进行摊销，以获得成本降低的全部好处。

图34：能源服务公司非洲电力解决方案



可持续性

上市移动网络运营商和铁塔运营公司致力于减少运营过程中的二氧化碳排放量。通过投资于高效的电力系统，移动网络运营商平均减少66%的燃料消耗，显著降低其二氧化碳排放量。

能源服务公司解决方案给移动网络运营商和铁塔运营公司带来的好处包括：

- 资本支出保护

将能源发电投资和运营维护（O&M）承包给能源服务公司，允许移动网络运营商和铁塔运营公司限制对资本支出前期兑现的影响，减少对非核心业务资产资本储备的调动。

- 降低成本

能源服务公司模式允许移动运营商和铁塔运营公司受益于总体OPEX支出的显著降低（根据国家的不同在20%到35%之间），这主要是由于能源开支降低，但也由于运维成本降低，不需要支付任何投资现金流，因为能源服务公司正在为它们投资。

- 可靠性

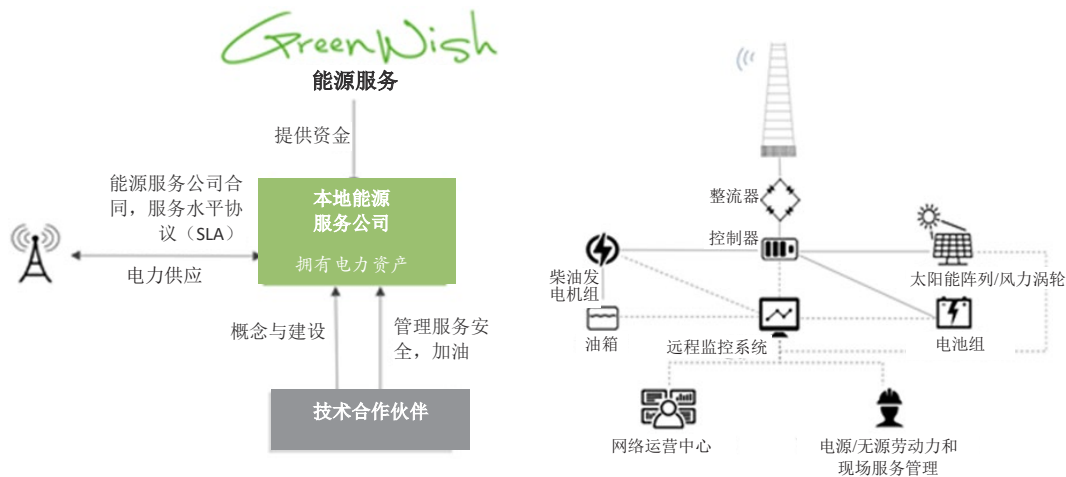
为了确保网络的可靠性和向客户提供的服务水平，能源对移动运营商和电信运营商至关重要。能源服务公司模式使他们受益于可靠的电力来源，几乎不需要现场维护，以及合同规定的性能保证。

9.2 典型的财务、合同和运营解决方案

本地的能源服务公司负责设计、采购、运营维护为电信铁塔供电的节能设备。每个本地能源服务公司将通过十年（或更长时间）的主服务协议与一个或多个客户签订合同，向他们收取：

- 固定基础设施费用，包括初始和更换资本支出、融资成本和能源服务公司管理成本；
- 涵盖燃料和电网成本的能源费，有保证的燃料节约量（风险转嫁给技术合作伙伴）；
- 运营维护费，涵盖运营维护服务（风险转嫁给技术合作伙伴）。

图35：电信公司合同和技术解决方案示例



风险分配

能源服务公司模式使移动网络运营商/铁塔运营公司能够将其铁塔相关的能源资产剥离到一个专门的专用工具当中。与标准的基于资产/项目融资结构一样，施工、绩效和运营风险将转嫁至项目的EPC和运营维护合作伙伴。

可复制性和可扩展性

由于运营维护（O&M）合作伙伴在当地的运营和活动已经与撒哈拉以南非洲的移动网络运营商合作，能源服务公司模式很容易在其他国家复制和扩展。能源服务公司和运营商之间的主服务协议应该在项目之间高度标准化。因此，本地能源服务公司将与未来的项目在能源服务公司组合层面捆绑在一起，使贷款人能够在组合层面或项目层面支持项目，始终依赖资产证券，但最终在组合方式上实现风险的多样化。

投资对环境的巨大影响

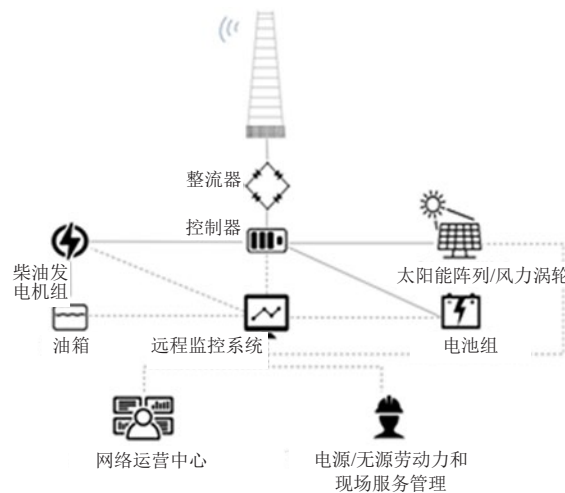
能源服务公司业务的基础是用混合发电系统取代燃料高度密集型的能源发电系统。例如，通过投资使得安装可再生能源设备发电或高效电池成为可能，平均减少66%的燃料消耗，仅在Orange DRC项目中，这相当于每年减少约5 500吨二氧化碳当量的排放量。

可靠的技术解决方案

每个本地的能源服务公司将用高效率的太阳能混合系统取代移动网络运营商或铁塔运营公司拥有的低效柴油发电系统，该系统将提供的电力：

- 更便宜，因为减少了对柴油发电机的依赖；
- 更清洁，因为燃料消耗减少50-100%；
- 更可靠，因为可以保证正常运行时间，可用性高达99.9%。

图36：可靠的技术解决方案示例



9.3 智慧绿色社区

9.3.1 智慧社区

智慧社区是一个全球性的实体和数字共享分发平台，面向服务不足的地区，最终目标是促进社会和经济的发展。

智慧社区涉及联合国定义的17个可持续发展目标中的其中15个，根据法国总统府的倡议，在2019年3月在内罗毕“同一个地球峰会”上提出，涉及法国发展机构法国开发署（AFD）和法国国家投资银行（Bpifrance）等机构。

通过B-to-G/B-to-B-to-C模式，由太阳能供电且实现联网的中心作为自主的微型仓库和角落和高效和智能的分配点，使商业、政府和非政府组织的产品和服务到达最后一英里。通过接入共享基础设施网络，他们可以以低成本扩展活动和业务，同时为社会和环境战略做出贡献。

智慧社区还可以可持续的方式为当地人释放机会，作为所有这些不同服务的一站式商店和进入全球市场的门户。

在可扩展和可盈利的模式中，目标是以最低的边际成本提供普遍服务：电、水、连接、教育、卫生、电子政务服务、银行以及农民、妇女、青年赋能。

图37：智能绿色村庄示例



来源：GreenWish

9.3.2 商业模式

进入市场的途径

通过智慧社区网络，政府和私营部门的合作伙伴凭借成本竞争力进入新的市场，进行分销或交付，而且还可以获得广告空间，并提供数据，这些数据对于公共政策输入意见和增进消费者的了解非常宝贵。企业对企业（B-to-B）合作伙伴享受智慧社区的包容性商业模式，通过获得水、电、连接、教育、健康、农业、创造就业、增强妇女和青年权能、电子政务服务和银行业务等，涉及联合国定义的17个可持续发展目标中的15个。

本地智慧社区由内部员工和作为商店租户的子特许经营人共同运营。

基础设施管理和数字平台由GreenWish通过分包商提供。

特许经营结构旨在加速智慧社区平台实现指数式增长，让本地和国际品牌在多个国家获得消费者和用户、广告、数字平台和共享物流、电力和连接。

该模式基于激励和指数级增长：盈利越快，可提供的额外服务和影响就越多。只有通过品牌和政府之间的共享和合作，它才能成功。

收入模式

智慧社区的收入模式基于：

- 来自B-to-B合作伙伴的长期租户或用户固定费用
- 现场实体和数字交易的交易费分成
- 广告

- 数据收集及变现，与地方政府共同拥有
- 来自私营合作伙伴和非政府组织的企业社会责任捐助，用于支持非营利社会活动

合同结构

最可行和可持续的模式是由地方政府通过开发性金融机构（DFI）资金或出口信贷为基础设施融资。

由于智慧社区的使命是通过提供新的和创新的产品和服务，促进服务不足地区的社会和经济的发展，既面向私营部门也面向公共部门。因此，将活动设置为特许权模式是有意义的，即政府拥有基础设施，而智慧社区负责建设和运营这些基础设施并管理活动。

9.3.3 重要服务

• 电力

智慧社区采用太阳能/电池供电，完全离网。

电力规模与智慧社区和服务（冷藏、连接等）的规模相适应，它们是模块化的，可适应城市周边或农村的地点。

商店租户也可以向个人客户出售现场充电的电力。

• 水

智慧社区配备了低成本的水净化系统，每天可为200-3 000人提供服务。

• 储存和冷藏

每个智慧社区都配备了存储和冷藏设备，必要的还配备了冷冻存储设备。

存储空间可用于快速消费品（食品、饮料、个人护理）、医药产品、电信设备和产品、太阳能家用系统、潜在的化肥和其他当地相关产品。这些储存点也将作为本地的分销点。

数字平台通过库存监控支持产品从进口到B-to-C销售的可追溯性。

• 零售

智慧社区有一个直接销售的街角商店。

• Wi-Fi连接热点

每个智慧社区都有各种形式的Wi-Fi接入。

如果村里没有互联网连接，无论是通过3G还是互联网服务提供商（ISP），都能提供不同的选择。

在完全脱离电网的环境中，通过最近的基站或卫星连接（VSAT），或使用电视空白频段，可以获得互联网。

智慧社区将成为在偏远地区以有竞争力的价格提供多种连接途径的实验室。

- **数字服务**

每个智慧社区都有专门的数字平台，作为一个服务市场，承载来自战略伙伴的电子服务，包括电子政务、电子卫生、电子教育、电子银行、电子农业、电子商务。

可以在内部开发一些具体的电子服务。

- **数据收集**

该平台将收集为客户和合作伙伴定制的实物和数字数据。

每个智慧社区为5公里范围内1.5-2万人提供服务，而且布局在位置优越交通便利的地区。

智慧社区的这种覆盖范围以及提供的多种服务和产品将为所有合作伙伴收集目标数据创造重大机遇。

这些数据由GreenWish和当地政府共同拥有，并根据使用目的以收费方式提供给其他合作伙伴。

9.3.4 企业社会责任（CSR）

智慧社区通过可持续发展目标衡量其在企业社会责任方面的影响。

智慧社区通过部署基础设施来改善能源获取并减少连接匮乏社区的数字鸿沟，涉及17个可持续发展目标中的其中15个。

图38：智能绿色社区和可持续发展目标



- 通过一般和具体行业培训，参与**教育**和能力建设。
- 释放**各种增值商品的分销**，包括太阳能产品和专门的农业投入。
- 通过女企业家和向**妇女**传播关键的服务和产品。
- 消除贫困，让人们获得**信息**，了解商品的真实市场价格。同时通过电子商务为他们提供一个新的销售渠道。
- 使**电子农业、电子卫生和电子教育**在最需要的地区成为现实。
- 提供连接，帮助使制造业更加智能化和降低碳密度。
- **协调**主要的私人参与者、公共机构、多边机构和非政府组织在连通性较低地区的行动。

9.4 相关链接：

水力发电技术及水力发电厂：

- <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=d8kQe9VdG4I>
- <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=B5qIB-asleo>
- <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=W1PR9fhfsf9c>
- https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=UW_SgFUfYds
- https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=_qaUufeq_7IIIII

电力转换专家

- <https://www.enetek-power.com/industries>

无线电力传输

- 可持续电子行业无线电力传输（WIPE）
 - <http://www.cost-ic1301.org/>
- 无线电力实际应用联盟（WiPoT）
 - <http://www.wipot.jp/english/>
- 宽带无线论坛（BWF）
 - <http://bwf-yrp.net/english/>
 - <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/renewable-capacity-growth-between-2019-and-2024-by-technology>

首字母缩略语

ESCO	能源服务公司
SDG	可持续发展目标
MNO	移动网络运营商
O&M	运营维护
IRENA	国际可再生能源机构
ADFD	阿布扎比发展基金
DFI	发展融资机构
CPE	用户驻地设备

国际电信联盟 (ITU)
电信发展局 (BDT)
主任办公室
Place des Nations
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

电子邮件: bdtdirector@itu.int
电话: +41 22 730 5035/5435
传真: +41 22 730 5484

数字网络和社会部 (DNS)
电子邮件: bdt-dns@itu.int
电话: +41 22 730 5421
传真: +41 22 730 5484

非洲

埃塞俄比亚

国际电联
区域代表处
Gambia Road
Leghar Ethio Telecom Bldg. 3rd floor
P.O. Box 60 005
Addis Ababa
Ethiopia

电子邮件: itu-ro-africa@itu.int
电话: +251 11 551 4977
电话: +251 11 551 4855
电话: +251 11 551 8328
传真: +251 11 551 7299

美洲

巴西

国际电联
区域代表处
SAUS Quadra 6 Ed. Luis Eduardo
Magalhães,
Bloco "E", 10^o andar, Ala Sul
(Anatel)
CEP 70070-940 Brasilia - DF
Brazil

电子邮件: itubrasilia@itu.int
电话: +55 61 2312 2730-1
电话: +55 61 2312 2733-5
传真: +55 61 2312 2738

阿拉伯国家

埃及

国际电联
区域代表处
Smart Village, Building B 147,
3rd floor
Km 28 Cairo
Alexandria Desert Road
Giza Governorate
Cairo
Egypt

电子邮件: itu-ro-arabstates@itu.int
电话: +202 3537 1777
传真: +202 3537 1888

独联体国家

俄罗斯联邦

国际电联
区域代表处
4, Building 1
Sergiy Radonezhsky Str.
Moscow 105120
Russian Federation

电子邮件: itumoscov@itu.int
电话: +7 495 926 6070

副主任兼行政和运营
协调部负责人 (DDR)
Place des Nations
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

电子邮件: bdtdeputydir@itu.int
电话: +41 22 730 5131
传真: +41 22 730 5484

数字知识中心部 (DKH)

电子邮件: bdt-dkh@itu.int
电话: +41 22 730 5900
传真: +41 22 730 5484

喀麦隆

国际电联
地区办事处
Immeuble CAMPOST, 3^e étage
Boulevard du 20 mai
Boîte postale 11017
Yaoundé
Cameroon

电子邮件: itu-yaounde@itu.int
电话: +237 22 22 9292
电话: +237 22 22 9291
传真: +237 22 22 9297

巴巴多斯

国际电联
地区办事处
United Nations House
Marine Gardens
Hastings, Christ Church
P.O. Box 1047
Bridgetown
Barbados

电子邮件: itubridgetown@itu.int
电话: +1 246 431 0343
传真: +1 246 437 7403

亚太

泰国

国际电联
区域代表处
4th floor NBTC Region 1 Building
101 Chaengwattana Road
Laksi,
Bangkok 10210,
Thailand

邮寄地址:
P.O. Box 178, Laksi Post Office
Laksi, Bangkok 10210, Thailand

电子邮件: itu-ro-asiapacific@itu.int
电话: +66 2 574 9326 - 8
+66 2 575 0055

欧洲

瑞士

国际电联
欧洲处
Place des Nations
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

电子邮件: euregion@itu.int
电话: +41 22 730 5467
传真: +41 22 730 5484

数字化发展合作伙伴部 (PDD)

电子邮件: bdt-pdd@itu.int
电话: +41 22 730 5447
传真: +41 22 730 5484

塞内加尔

国际电联
地区办事处
8, Route du Méridien Président
Immeuble Rokhaya, 3^e étage
Boîte postale 29471
Dakar - Yoff
Senegal

电子邮件: itu-dakar@itu.int
电话: +221 33 859 7010
电话: +221 33 859 7021
传真: +221 33 868 6386

智利

国际电联
地区办事处
Merced 753, Piso 4
Santiago de Chile
Chile

电子邮件: itusantiago@itu.int
电话: +56 2 632 6134/6147
传真: +56 2 632 6154

印度尼西亚

国际电联
地区办事处
Sapta Pesona Building
13th floor
Jl. Merdan Merdeka Barat No. 17
Jakarta 10110
Indonesia

电子邮件: itu-ro-asiapacific@itu.int
电话: +62 21 381 3572
电话: +62 21 380 2322/2324
传真: +62 21 389 5521

津巴布韦

国际电联
地区办事处
USAF POTRAZ Building
877 Endeavour Crescent
Mount Pleasant Business Park
Harare
Zimbabwe

电子邮件: itu-harare@itu.int
电话: +263 242 369015
电话: +263 242 369016

洪都拉斯

国际电联
地区办事处
Colonia Altos de Miramontes
Calle principal, Edificio No. 1583
Frente a Santos y Cía
Apartado Postal 976
Tegucigalpa
Honduras

电子邮件: itutegucigalpa@itu.int
电话: +504 2235 5470
传真: +504 2235 5471

印度

国际电联
地区办事处和
创新中心
C-DOT Campus
Mandi Road
Chhatrapur, Mehrauli
New Delhi 110030
India

电子邮件: itu-ro-southasia@itu.int

国际电信联盟
电信发展局
Place des Nations
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

ISBN: 978-92-61-35965-2



9 789261 359652

瑞士出版
日内瓦，2023

图片鸣谢: Shutterstock