

风电场无线自组网通信解决方案

方案名称： 风电场全域无线自组网通信系统

核心设备： ZumMesh 7030-40 / 7030-35 / 7020-30

编制单位： 北京比特威电讯科技有限公司

日期： 2026 年 9 月

1 方案概述

1.1 编制目的

本方案针对风电场"点多面广、位置偏远、布线困难、运维人力紧张"的现实条件，基于 ZumMesh 7030-40、7030-35、7020-30 三款无线图数自组网电台，构建覆盖升压站、风机塔基与机舱、场区巡检通道及周边海域的全域无线通信网络，为风电场视频监控、设备状态监测、SCADA 数据传输、巡检作业图传与应急通信提供统一的无线承载平台。

1.2 方案思路

风电场通信的难点不在单点距离，而在于**空间分布的分散性与业务类型的差异性**。本方案不对全场采用单一型号、单一架构，而是按"**距离分层、业务分级、设备分级**"的原则组织：

层级	覆盖对象	距离特征	带宽需求	选用设备

层级	覆盖对象	距离特征	带宽需求	选用设备
骨干层	各机群汇聚点 ↔ 升压站	20~50 km	高（多路视频汇聚）	7030-40 (20W)
接入层	风机塔基 ↔ 机群汇聚点	5~20 km	中（本机业务）	7030-35 (6W)
移动层	巡检人员/车辆/机器人	0~5 km 或跟随	中低	7020-30 (3W)

核心逻辑： 让 20W 的设备只承担远距骨干（功率用在刀刃上），让 6W 设备承担机群接入（近距高带宽），让 3W 的轻量设备承担移动与补盲（低功耗、IP65 便携）。这样既保证了全场覆盖，又控制了供电、功耗与投资。

1.3 方案边界说明

本方案为**通信网络技术方案**，覆盖网络架构、链路预算、带宽容量测算、抗干扰设计、设备选型配置、安装部署与验收测试。风机的机械控制策略、叶片变桨控制逻辑、电网调度 AGC/AVC 策略、风功率预测算法等业务系统内容不属于本方案范围，本方案提供的是承载上述业务的数据通道。

2 风电场通信需求分析

2.1 风电场通信的现实痛点

风电场通信长期面临五类矛盾：

(1) 地理分散，光纤成本高。 一座 100 MW 级陆上风电场，20 台风机分布于 8 km × 6 km 范围内，每台风机到升压站的距离从数百米到十几公里不等。若全部敷设光纤，土建开挖费用高昂，且在农田、山地、滩涂等环境下施工阻力大、周期长。对于海上风电，海缆敷设成本更高一个量级。

(2) 机舱旋转，线缆不可靠。 风机机舱需随风向偏航旋转，塔筒内滑环虽可传输信号，但滑环是易损件，且带宽有限。机舱顶部、叶片等位置根本无法布线。这是无线方案在风机场景不可替代的根本原因。

(3) 设备分散，统一运维困难。 20 台风机意味着 20 个塔基机柜、20 个机舱设备点、20 个箱变测控点，加上升压站与场区安防，管理对象上百个。传统点对点无线方案需要逐个配置、逐条链路调试，运维工作量巨大。

(4) 业务多样，带宽需求差异大。 机舱视频监控需 2~4 Mbps/路，振动监测仅需 kbps 级，SCADA 数据量小而要求高可靠，巡检视频图传需要突发大带宽。不同业务对带宽、时延、可靠性要求各不相同，单一通道难以兼顾。

(5) 环境严苛，设备可靠性要求高。 风机机舱内存在强振动，塔基机柜空间狭小、夏季高温，海上风电场还要面对高盐雾、高湿度。通信设备必须满足宽温、防振、防尘防水要求。

2.2 通信需求清单

业务类型	业务内容	带宽需求	时延要求	覆盖位置
机舱视频监控	机舱内部、齿轮箱、发电机巡检视频	2 Mbps/路 × 2	≤ 200 ms	机舱

业务类型	业务内容	带宽需求	时延要求	覆盖位置
塔基安防视频	塔基入口、平台 周界	1 Mbps/路	≤ 200 ms	塔基
振动状态监测	主轴、齿轮箱、 发电机振动	≤ 100 kbps	≤ 500 ms	机舱
温度/转速监测	轴承温度、发电 机转速	≤ 50 kbps	≤ 1 s	机舱
叶片状态感知	叶片载荷、裂纹 监测	≤ 100 kbps	≤ 1 s	轮毂/叶片
箱变测控	电气量、开关状 态	≤ 100 kbps	≤ 100 ms	箱变
SCADA/AGC 数 据	全场运行数据、 调度指令	≤ 2 Mbps (全 场)	≤ 100 ms	全场
升压站安防	站区周界、主变 区域视频	2 Mbps/路 × 8	≤ 200 ms	升压站
巡检图像回传	无人机、巡检机 器人图传	4 Mbps	≤ 300 ms	移动
应急通信	语音、视频会商	1 Mbps	≤ 200 ms	全场

2.3 关键指标要求

指标项	要求值
网络可用率	≥ 99.9%
承载方式	自建专网，不依赖公网
单跳时延	≤ 10 ms
端到端时延	≤ 100 ms (SCADA/AGC)
组网规模	覆盖全场 20 台风机 + 升压站
链路自愈时间	≤ 10 s
设备防护等级	≥ IP65 (室外/机舱)
工作温度	-40℃ ~ +55℃
抗干扰	支持跳频与智能选频
供电方式	DC 24V (站内直流/太阳能互补)

3 设备选型与能力分析

3.1 三款设备能力对比

对比项	ZumMesh 7030-40	ZumMesh 7030-35	ZumMesh 7020-30

对比项	ZumMesh 7030-40	ZumMesh 7030-35	ZumMesh 7020-30
发射功率	20 W	6 W	3 W
接收灵敏度	-110 dBm @1.25MHz	-110 dBm @1.25MHz	-109 dBm @1.25MHz
支持频宽	1.25~40 MHz	1.25~40 MHz	1.25~20 MHz
峰值吞吐量	96 Mbps @20MHz	96 Mbps @40MHz	49 Mbps @20MHz
整机重量	≤ 2200 g	≤ 1500 g	≤ 1200 g
外形尺寸	≤ 265×191×48 mm	≤ 201×176×44 mm	≤ 168×157×35 mm
常发功耗	≤ 80 W ± 20	≤ 40 W ± 8	≤ 15 W ± 5
待机功耗	≤ 7 W ± 1	≤ 5 W ± 1	≤ 5 W ± 1
工作电压	24-28 V	24-30 V	24-28 V
防护等级	IP20 / IP65	IP65	IP65
视距通信距离	≤ 300 km	≤ 150 km	≤ 100 km
组网规模	256 节点, N 跳	256 节点, N 跳	256 节点, N 跳
跳频	1000 次/秒@智能跳 频选频	1000 次/秒	1000 次/秒
加密	可选 AES256	可选 AES256	可选 AES256

对比项	ZumMesh 7030-40	ZumMesh 7030-35	ZumMesh 7020-30
接口	SMA×2、网口×2、 RS232×2、TTL	SMA×2、网口×2、 RS232×2、TTL	NK×2、网口×2、 RS232×2、 TTL/SBUS
工作温度	-40℃ ~ +55℃	-40℃ ~ +55℃	-40℃ ~ +55℃

共同技术特征： 三款设备均采用软件无线电（SDR）架构，支持低频 MESH 无中心自组网，支持 256 节点、N 跳组网，冷启动 40 秒入网，具备智能选频、收发异频率、收发异频宽三重抗干扰机制与 STDM 空间信道复用技术，均支持串口指令数据与音视频数据同时传输（图数一体）。

3.2 距离-带宽特性

这是选型与部署间隔设计的核心依据：

ZumMesh 7030-40 (20W)

通信距离	可用带宽	适用场景
20 km	80 Mbps	机群到升压站骨干
50 km	65 Mbps	远距机群骨干
100 km	36 Mbps	超远距骨干、跨场区
150 km	22 Mbps	场群互联
200 km	12 Mbps	极限远距回传

ZumMesh 7030-35 (6W)

通信距离	可用带宽	适用场景
5 km	90 Mbps	机群内近距接入
10 km	70 Mbps	机群内中距接入
20 km	60 Mbps	机群内远距接入
50 km	25 Mbps	跨机群中继
100 km	20 Mbps	备用回传

ZumMesh 7020-30 (3W)

通信距离	可用带宽	适用场景
5 km	45 Mbps	巡检作业近距图传
10 km	34 Mbps	场区移动通信
20 km	29 Mbps	巡检车远距回传
50 km	17 Mbps	场区边缘覆盖
100 km	6 Mbps	应急通信兜底

3.3 选型结论

部署位置	选用设备	选型理由
升压站通信塔	7030-40	20W 功率支撑远距覆盖全

部署位置	选用设备	选型理由
		场，96 Mbps 汇聚多机群回传流量
机群汇聚点（风机塔基）	7030-40 或 7030-35	视机群到升压站距离选择，>20 km 用 7030-40
各风机塔基	7030-35	6W/1500g 适配塔基机柜，96 Mbps@40MHz 满足本机多路视频
机舱内	7030-35	支持宽温防振，但需注意机舱空间与振动环境适配
巡检车载 / 移动	7020-30	3W/1200g/IP65 轻便，适合车载与临时部署
场区安防点位	7020-30	IP65 室外防护，49 Mbps 满足单点安防视频
海上平台 / 升压站周边	7020-30 或 7030-35	按距离与业务量选择

4 网络架构设计

4.1 架构验算

以 100 MW 级陆上风电场（20 台风机、场区约 8 km × 6 km、1 座升压站）为例进行容量测

算。

业务带宽需求

业务项	单点带宽	数量	小计
机舱高清视频（2 路/台）	2.0 Mbps	20	40.0 Mbps
塔基安防视频（1 路/台）	1.0 Mbps	20	20.0 Mbps
振动/温度/转速监测	0.2 Mbps	20	4.0 Mbps
叶片状态感知	0.1 Mbps	20	2.0 Mbps
箱变电气量测控	0.1 Mbps	20	2.0 Mbps
升压站视频监控（8 路）	2.0 Mbps	8	16.0 Mbps
巡检无人机/机器人图传	6.0 Mbps	1	6.0 Mbps
全场 SCADA/AGC 数据	2.0 Mbps	1	2.0 Mbps
全场合计	—	—	92.0 Mbps

单点直连方案验证（不可行）

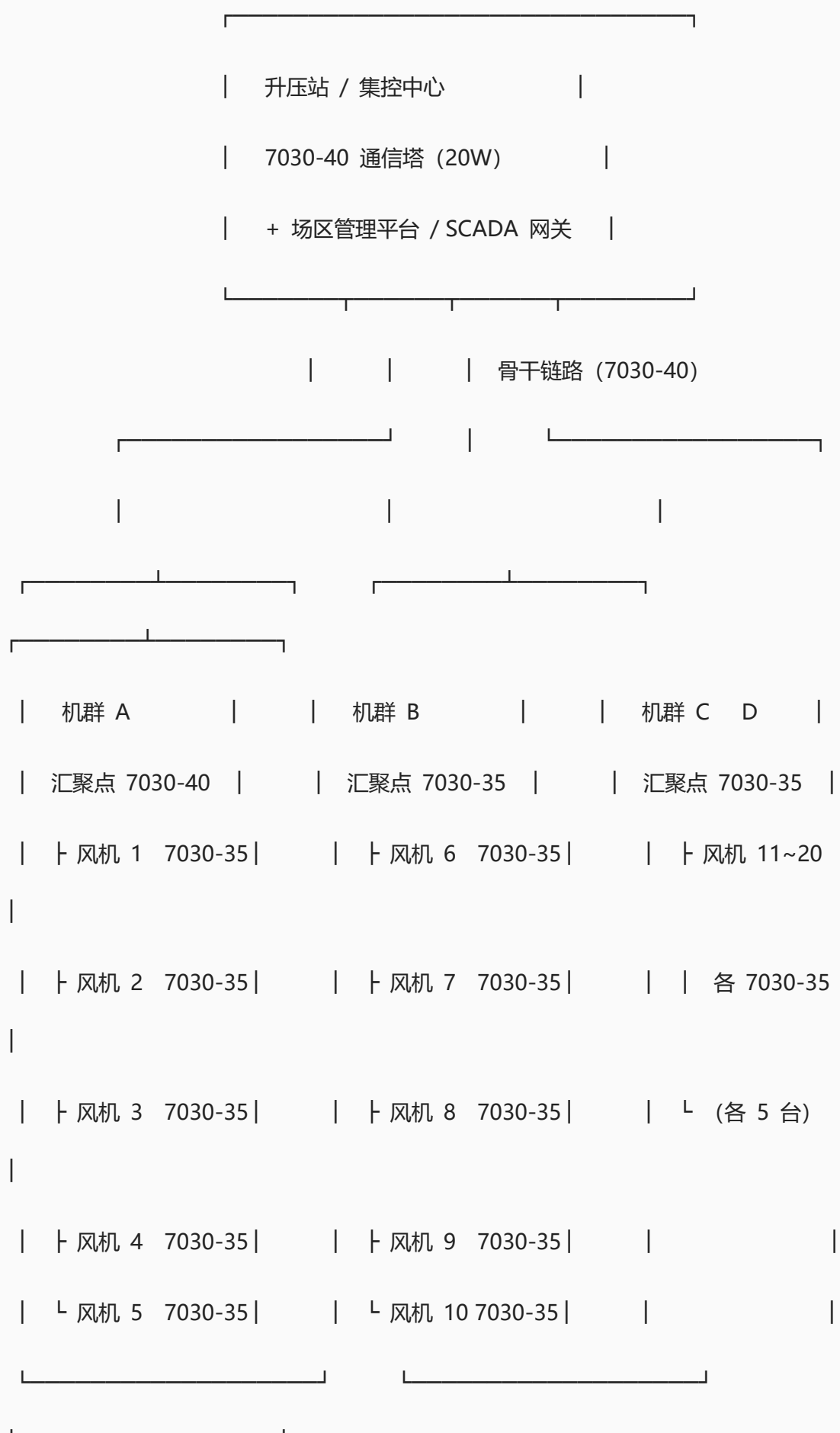
若全场风机通过一台 7030-40 直接与升压站建链：

- 7030-40 峰值 96 Mbps, 按 60% 效率折算有效带宽 57.6 Mbps
- 需求 92.0 Mbps > 可用 57.6 Mbps, **带宽缺口 34.4 Mbps (缺口率 37%)**
- 附带问题: 边缘风机距升压站超过 5 km 后带宽进一步衰减; 升压站单点设备故障将导致全场通信中断

结论: 星形直连架构不可行, 必须分层分群。

4.2 三层分群架构

本方案采用"**骨干层 + 接入层 + 移动层**"的三层架构:



4.3 分层容量复核

接入层 (7030-35)

项目	数值
机群规模	5 台风机
每台业务带宽	3.4 Mbps (含机舱+安防+监测+箱变)
机群业务需求	$5 \times 3.4 = 17.0 \text{ Mbps}$
7030-35 峰值	96 Mbps
有效带宽 ($\leq 5 \text{ km}$, 1 跳, 80% 效率)	76.8 Mbps
有效带宽 ($\leq 20 \text{ km}$, 1~2 跳, 60% 效率)	57.6 Mbps
余量	40.6 ~ 59.8 Mbps (2.4~3.5 倍)

骨干层 (7030-40)

项目	数值
骨干链路数	4 条 (每个机群 1 条回传升压站)
单路骨干承载	17.0 Mbps (本机群汇聚流量)
20 km 处可用带宽	$80 \text{ Mbps} \times 60\% = 48.0 \text{ Mbps}$
50 km 处可用带宽	$65 \text{ Mbps} \times 60\% = 39.0 \text{ Mbps}$

项目	数值
100 km 处可用带宽	36 Mbps × 60% = 21.6 Mbps
余量	28~45 Mbps (1.3~2.8 倍)

结论：三层架构下，接入层余量 2.4~3.5 倍、骨干层余量 1.3~2.8 倍，可充分满足当前业务需求，并为后续新增风机、增加视频点位预留了扩展空间。

4.4 扩展性设计

扩展场景	扩展方式	对现有架构影响
新增风机	风机加装 7030-35，开机自动入网	无，无需修改既有配置
机群规模扩大	单群超过 9 台时拆分为新机群，新增 1 条骨干	仅增加升压站侧设备
增加视频点位	直接接入现有网络，占用余量带宽	无
场区外延（二期场区）	用 7030-40 建立跨场区骨干	无，骨干层延伸
海上平台接入	7030-40 海陆骨干 + 7020-30 平台覆盖	新增独立链路

4.5 网络自愈机制

无中心自组网架构下，可靠性来自拓扑冗余而非单点加固：

故障场景	网络行为	业务影响
单台风机节点失效	相邻风机自动重选中继路径	该风机业务中断，其余不受影响
机群汇聚点失效	机群内其他节点晋升为中继，重建回传	该机群短暂中断后恢复
骨干链路受扰	智能选频切换，或经其他机群迂回	秒级抖动
升压站主链路故障	备用链路（其他机群中继）自动接管	业务降级但不断
新增/移除节点	动态路由自动收敛，无需人工配置	无感

5 分场景部署方案

5.1 升压站侧部署

项目	配置

项目	配置
设备	ZumMesh 7030-40 × 2 (主备)
安装位置	升压站通信塔或主控楼顶制高点
天线	高增益定向天线 (指向各机群) + 全向天线 (场区覆盖)
安装方式	抱杆固定 + 室外防水机柜
供电	站内 DC 24V 直流屏供电, 配置 UPS
接口	网口接入站内交换机, 与 SCADA 网关、视频平台对接
防护	IP65, 室外安装

设计要点： 升压站作为全网汇聚点，配置主备两台 7030-40，主机承载常规业务，备机在主机故障时接管，或分担部分机群回传流量。同时配置 1 台 7030-35 或 7020-30 负责站区内部及周边覆盖。

5.2 风机侧部署

(1) 塔基机柜

项目	配置
设备	ZumMesh 7030-35 (IP65) × 1

项目	配置
安装位置	塔基电气柜内或柜外壁挂
天线	全向天线安装于塔基外侧或塔筒外壁
供电	塔基 24V 直流电源或开关电源模块
接口	网口接塔基交换机，连接箱变测控、安防视频、塔基监控

(2) 机舱

项目	配置
设备	ZumMesh 7030-35 × 1
安装位置	机舱内部，靠近滑环位置
天线	机舱外壁或机舱罩顶部，采用全向天线
供电	机舱 24V 直流电源
接口	网口接机舱内摄像头、振动监测单元
振动防护	采用减振安装支架，避免直接刚性固定在振动源上

(3) 关键设计说明

- **机舱与塔基的链路：**机舱到塔基的通信若走塔筒内滑环，则受滑环带宽与可靠性限制；本方案建议机舱设备直接通过机舱外部天线与塔基或邻近风机无线建链，**彻底绕开滑环瓶颈**。这是无

线方案在风机场景的核心价值点。

- **天线朝向：**塔基全向天线应注意避免被塔筒自身金属结构完全遮挡，建议偏离塔筒中轴线一定角度安装，或采用双天线分集。
- **防雷接地：**风机是高耸结构，天线馈线与设备必须做好防雷接地，与风机原有防雷系统等电位连接。

5.3 移动层部署

应用对象	设备	安装方式	说明
巡检车	7020-30	车顶磁吸或支架固定	车顶安装小型全向天线，随车移动，就近接入
巡检人员	7020-30	背包式/肩挂	3W/1200g/IP65 便携，支持语音与视频回传
巡检机器人	7020-30	机体内置	3W 轻量，24V 供电直接取用
巡检无人机	7020-30	机载	1200g 相对较重，适用于中大型巡检无人机

应用对象	设备	安装方式	说明
临时点位	7020-30	三脚架+电池	应急或临时补盲，快速部署

移动漫游设计： 7020-30 支持无缝漫游，巡检车跨越机群边界时自动切换接入点，业务不中断。

设备在远离机群时可通过多跳中继经临近风机节点回传。

5.4 频点规划

频点	用途	建议频段	带宽	说明
f1	骨干链路	1420-1530 MHz	20 MHz	7030-40 主用， 远距抗衰减弱
f2	机群 A 接入	1350-1450 MHz	40 MHz	7030-35 高带宽
f3	机群 B 接入	1660-1710 MHz	40 MHz	与 f2 物理隔离
f4	机群 C/D 接入	2200-2300 MHz	40 MHz	与 f2、f3 隔离
f5	移动层/备份	790-820 MHz	20 MHz	7020-30 移动接入，绕射强

频段选择说明：

- **L 波段 (1.3~1.7 GHz)：** 绕射能力优于 2.4G/5.8G，穿透雨雾损耗小，适合风电场开阔环境与远距链路
- **UHF 波段 (790-820 MHz)：** 绕射能力最强，适合巡检移动场景与地形起伏区域

- **2.3 GHz 波段**：带宽资源充裕，适合机群内高带宽接入
- 三款设备共用频段规划表，可实现频点统一编排与灵活调整

6 抗干扰与可靠性设计

6.1 抗干扰机制

风电场本身是强电磁干扰源：大型发电机、变流器、箱式变压器、高压开关操作均产生宽带干扰；同时风电场多位于沿海、山顶等开阔地带，易受外部无线信号影响。本方案通过三重机制应对：

机制	原理	效果
智能选频	实时监测各频点底噪，自动切换至干净频点	规避持续性干扰，无需人工干预
收发异频率	发射与接收使用不同频率	干扰方难以同时压制收发方向
收发异频宽	收发使用不同带宽配置	提升对特定干扰型式的规避能力
跳频（1000 次/秒）	载频高速跳变	单跳驻留 1 ms，干扰方无法锁定
STDM 空间信道复用	空间维度复用信道	网络效率提升 50%，降低拥塞概率

6.2 供电与防雷设计

项目	设计要点
升压站设备	站内直流屏 DC 24V，配置 UPS，停电时维持通信
塔基设备	塔基直流电源，建议配置小型 UPS 或后备电池
机舱设备	机舱 24V 直流电源，注意与风机主控系统电源隔离
移动设备	便携电池 + 车载电源，支持 24V 取电
防雷接地	天线、馈线、设备外壳就近接地，与风机防雷系统等电位连接，馈线加装避雷器
电源防护	电源入口加装浪涌保护器（SPD），防止雷击感应过电压

6.3 环境适应性

环境因素	设备应对
宽温（-40℃~+55℃）	三款设备均满足工业级宽温，适配北方冬季与机舱高温

环境因素	设备应对
强振动（机舱）	采用减振支架安装；机舱内振动主要来自传动链，建议设备安装位置远离主轴
高湿/盐雾（海上）	IP65 防护；海上场景建议选用更高防护或不锈钢外壳版本，并做防盐雾处理
灰尘（塔基）	IP65 防护，机柜加装防尘滤网
高空电磁干扰	三重抗干扰机制 + 频点规划避让

6.4 通信安全

- 支持 AES256 加密（三款设备均支持）
- 支持 IP/MAC 网络透传，可与上层 VPN、加密网关叠加
- 专网独立运行，不依赖公网，物理隔离度高
- 建议在 SCADA 侧部署工业防火墙，对无线侧与生产控制区之间做安全隔离

7 设备配置清单

7.1 按 100 MW / 20 台风机规模配置

序号	部署位置	设备型号	数量	说明

序号	部署位置	设备型号	数量	说明
1	升压站通信塔	ZumMesh 7030-40	2	主备配置，汇聚 全网流量
2	升压站站区覆盖	ZumMesh 7020-30	2	站区安防、移动 接入
3	机群汇聚点	ZumMesh 7030-40	2	远距机群 (>20 km) 汇聚
4	机群汇聚点	ZumMesh 7030-35	2	近距机群 (≤20 km) 汇聚
5	风机塔基	ZumMesh 7030-35	20	每台风机 1 台
6	风机机舱	ZumMesh 7030-35	20	每台风机 1 台
7	巡检车	ZumMesh 7020-30	2	巡检车辆
8	巡检人员便携	ZumMesh 7020-30	4	运维班组
9	应急备份	ZumMesh 7020-30	2	应急与临时补点

序号	部署位置	设备型号	数量	说明
合计	—	56 台	—	

7.2 设备数量汇总

型号	数量	主要用途
ZumMesh 7030-40	4	升压站主备 + 远距机群汇聚
ZumMesh 7030-35	44	风机塔基、机舱、近距机群汇聚
ZumMesh 7020-30	10	站区覆盖、移动巡检、应急补点
总计	58 台	—

说明： 上表为 100 MW / 20 台风机规模的参考配置。实际数量需根据场区实际尺度、机群划分方式、视频点位数量与升压站布置确定，可在方案实施前根据现场勘测结果调整。

7.3 配套材料

类别	内容
天线	全向天线（5 dBi）、定向天线（12~15 dBi，骨干用）、天线支架

类别	内容
馈线	低损耗同轴电缆（建议 1/2" 或更优），长度按现场定制
线缆	电源线、网线（超五类屏蔽或六类）、RS232 线缆
供电	开关电源模块（24V）、UPS、后备电池、浪涌保护器
安装件	抱杆、机柜、减振支架、防水接头、防雷器、接地线
工具备件	备用设备各 1 台、备用天线、备用馈线、现场调试工具

8 实施与验收

8.1 实施流程

阶段	工作内容	交付物
1. 现场勘测	场区地形测绘、风机点位实测、电磁环境普查、升压站条件确认	勘测报告

阶段	工作内容	交付物
2. 方案设计	机群划分、频点规划、链路预算校核、点位图绘制	施工设计图
3. 频率申请	按当地无线电管理规定办理频率使用许可	频率许可文件
4. 设备安装	升压站、塔基、机舱设备安装与布线	安装记录
5. 单点调试	逐点通电、入网、参数配置	单点测试记录
6. 链路联调	逐条链路测试带宽、时延、丢包率	链路测试报告
7. 全网优化	频点优化、路由优化、参数整定	优化报告
8. 业务割接	视频、SCADA、监测业务分批上线	割接方案与记录
9. 试运行	连续试运行观察网络稳定性	试运行报告
10. 验收交付	按验收标准测试、培训、文档移交	验收报告 + 操作手册

8.2 验收测试项目

测试项	测试方法	合格判据
网络覆盖率	全场逐点测试信号强度	全场风机点位覆盖率 100%
单跳时延	环回时延测试	$\leq 10\text{ ms}$
端到端时延	SCADA 数据端到端测试	$\leq 100\text{ ms}$
链路带宽	逐条链路吞吐量测试	满足设计值（接入层 $\geq 17\text{ Mbps}$ 可用）
丢包率	长时间业务流测试	$\leq 0.1\%$
自愈时间	主动断电模拟节点故障	网络恢复 $\leq 10\text{ s}$
漫游测试	巡检车跨机群行驶	业务不中断，切换丢包 ≤ 1 个
抗干扰测试	加扰环境下链路保持能力	跳频与选频正常动作，业务可维持
网络可用率	连续 30 天运行统计	$\geq 99.9\%$
环境适应性	高低温、振动、防护检查	符合设备规格书标称

8.3 风险与对策

风险项	影响	对策
实际带宽低于标称值	视频卡顿、监测数据延迟	前期现场拉距实测；视频码率可自适应下调；预留余量已按60% 效率折算
塔筒遮挡导致链路不稳	边缘风机丢包	天线偏心安装或双天线分集；必要时在中间位置增设中继
机舱强振动影响设备寿命	设备松动、故障	减振支架安装；选用工业级设备；定期巡检紧固
场区电磁干扰	链路质量下降	启用智能选频与跳频；任务前完成电磁环境普查
机舱滑环带宽不足	机舱与塔基数据传输受限	机舱设备走外部无线链路，绕开滑环
恶劣天气影响	雨雾导致链路衰减	选 L 波段/UHF 波段（雨衰小）；预留链路余量
供电不稳定	设备掉电重启	配置 UPS/后备电池；电源加装 SPD
频率协调问题	无法按计划使用频点	提前办理频率许可；规划备用

风险项	影响	对策
		频点方案

9 方案优势总结

9.1 技术优势

优势项	具体体现
无中心自组网	无单点故障，任一节点失效不影响全网；新增风机自动入网，无需人工配置
分层分级选型	20W / 6W / 3W 三档功率按距离分层，功率用在最需要的位置，兼顾覆盖与成本
图数一体	一路电台同时承载串口监测数据与视频，减少设备与线缆数量
强抗干扰	1000 次/秒跳频 + 智能选频 + 收发异频，适应风电场强电磁环境
绕开滑环	机舱设备走外部无线链路，规避滑环带宽瓶颈与易损件问题
免布线	无需敷设光纤，规避农田开挖、山地施工、海缆敷设的高昂成本

优势项	具体体现
宽温 IP65	三款设备均满足 -40℃~+55℃ 与 IP65 防护，适配风电场恶劣环境
大组网规模	256 节点、N 跳，满足大型风电场甚至场群互联的需求
频率资源灵活	12 个频段（0.6G~4.2G）可选，便于频率规划与干扰规避

9.2 经济价值

(1) 显著降低建设成本。 无需敷设全场光纤，省去土建开挖与海缆敷设费用；利用风机现有塔基机柜与供电条件，减少配套设施投入。

(2) 大幅提升运维效率。 全网设备统一网管，20 台风机、上百个业务点在一个平台上监控；故障定位从"逐点排查"变为"平台告警 + 远程诊断"。

(3) 支撑预测性维护。 机舱振动、温度、叶片状态数据的高频回传，使风机状态监测从"事后维修"转向"预测性维护"，减少非计划停机损失。

(4) 改善作业安全。 巡检人员与车辆的实时图传与定位，使野外作业从"失联状态"变为"可控状态"，遇险时可及时呼救与定位。

(5) 具备扩展弹性。 新增风机、新增视频点位、场区二期扩展均只需新增设备入网，架构不变、平台不动。

9.3 与替代方案对比

对比项	光纤方案	4G/5G 公网	传统点对点微波	本方案
建设成本	高（土建/海缆）	低	中	中低（免布线）
覆盖灵活性	差（需预埋）	好（依赖基站）	中	好
带宽	高	中高	中	高（96 Mbps）
自主可控	高	低（依赖运营商）	高	高（专网）
单点故障影响	光纤断则断	依赖基站	断链即失联	自愈，无单点
机舱旋转适配	差（滑环瓶颈）	好	好	好（无滑环）
运维复杂度	低	低	高（逐点配置）	低（自动组网）
恶劣环境适应性	好	依赖基站供电	中	好（IP65/宽温）
扩展成本	极高	低	中高	低

结论： 光纤方案适合升压站内部主干，但全场敷设不经济；公网方案存在覆盖盲区与自主可控问题，不适合承载生产控制类业务；传统点对点微波需要逐条链路规划与对准，运维工作量大且无自愈能力。本方案在**免布线、自愈能力、运维效率、自主可控**四个维度上综合优势明显，是风电场通信的适配方案。

10 结语

风电场的通信问题，本质上是“分散的资产如何被统一地感知与控制”的问题。20 台风机散布在数平方公里范围内，每一台都在旋转、振动、受载，每一台都需要被看见。

ZumMesh 7030-40、7030-35、7020-30 三款设备以 20W / 6W / 3W 的功率梯度、96 / 96 / 49 Mbps 的带宽能力、300 / 150 / 100 km 的距离覆盖与统一的 IP65 防护与宽温标准，构成了从升压站骨干到机舱末梢、从固定点位到移动巡检的完整通信梯队。

在这套体系下，风电场不再是“一堆孤立的发电单元”，而是一个**每一台风机都在线、每一条链路都能自愈、每一个点位都可远程诊断**的有机整体。这既降低了运维成本，也为风电场的无人化、智能化运营打下了网络底座。

北京比特威电讯科技有限公司

www.bitwave.com.cn

本方案中的设备参数引自 ZumMesh 7030-40 / 7030-35 / 7020-30 产品规格书；容量测算基于 100 MW / 20 台风机的典型场区假设，实际配置需依据现场勘测结果与业主需求确定。