海上风电场的工业以太网通信

文/程　成
百通赫思曼通讯科技（上海）有限公司

风能作为清洁持续的可再生能源，已经成为全世界政府和各国能源巨头关注的焦点。针对海上风电场这一特殊的应用场景，介绍了现有的工业以太网交换机产品和网络通信方案，提出了现有网络通信方案所存在的问题以及新一代通信方案是如何解决这些问题的。

在全球聚焦发展低碳经济以及我国提出“双碳”目标的背景下，风能作为清洁持续的可再生能源，已经成为全世界政府和各国能源巨头关注的焦点。随着陆地风电场的不断建设，技术日益成熟，成本不断下降，陆上风电飞速发展，仅2019年全球陆上风电新增装机容量就达到61.8 GW。但是受到陆上可开发土地资源和风能资源的限制，海上风电已逐渐成为一种发展趋势。特别是我国东南沿海经济发达，电网架构完善，且海上风能资源丰富，非常适合海上风电的大规模开发和并网。

海上风电行业发展的现状

2020年，全球海上风电新增并网容量突破6 GW，与2019年基本持平。而在2010年，全球海上风电新增装机容量不到1 GW。与此同时，海上风电占全球新增风电装机容量的占比也从2010年的2.5%上升到目前的7%。

1. 国外海上风电行业发展的现状及趋势

从新增装机国家排名看，2020年全球前五强海上风电市场分别为中国、荷兰、比利时、英国和德国。专业机构预测，2020—2025年，全球海上风电市场将会有30%以上的年均增速。该判断基于以下原因：①海上风电成本的快速下降，得益于海上风电机组的大型化，可以明显地节约前期投资和后期运维成本；②各国政府对海上风电发展目标的上调，在亚洲，中国、越南、日本和韩国市场会有快速的发展，欧洲市场除了西欧国家继续大力发展海上风电外，东欧国家也将开始海上风电的建设，此外美国首个大型海上风电场的并网也将在2023年实现；③漂浮式风电的产业化，由于漂浮式基础结构适用于水深50～200 m的深远海域，漂浮式海上风电的适用范围会更加广泛，根据《世界能源报告》，到2030年前，全球漂浮式风力装机容量将达到8～10 GW。

全球海上风电机组发展趋势如图1所示，漂浮式海上风电场示意图如图2所示。

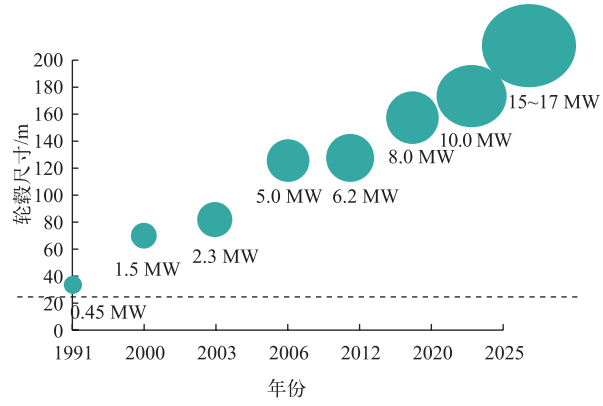

图1　全球海上风电机组发展趋势

数据来源：GWEC市场数据平台，2020年8月

2. 国内海上风电行业发展的现状

我国海上风电起步较晚，但近些年的发展却极

为迅速。自2018年以来，我国新增的海上风电装机一直领先于其他国家。特别是在2020年，我国新增并网容量首次突破3 GW。按累计装机统计，我国于2020年底已经超过德国成为全球第二大海上风电市场。2021年我国已经取代英国成为全球最大的海上风电市场。

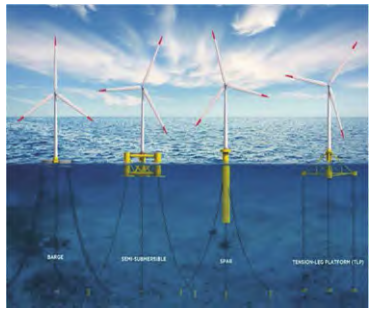

图2　漂浮式海上风电场示意图

（1）装机并网规模持续增长

2006年起步、2008年投资建设的我国第一座大型海上风电项目——上海东海大桥海上风电项目，成功安装了34台国产3 MW的离岸型风电机组，总装机容量102 MW，拉开了中国海上风电开发的序幕。

2016年能源局发布风电发展“十三五”规划，并出台了一系列重大利好政策鼓励海上风电发展，也意味着国内海上风电的发展从“项目示范”走向了“快速开发”的快车道。

2020年，海上风电项目迎来了抢装关键时期，据统计，上半年就有30个项目同时在建，装机容量达1 297.28万kW，包含11个新开工项目和3个全部并网项目。

（2）风机单机容量逐年提高

截至2019年底的数据，从单机容量上看，4 MW机组累计装机最多，而5 MW已成为海上风电项目的主流机型，如图3所示。

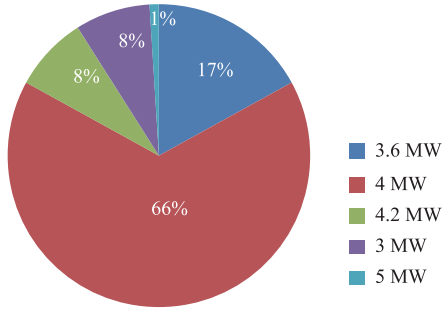

图3　2019年底我国海上风电单机容量占比

2020年7月12日，国内首台10 MW风机已在福建兴化湾海上风电场成功并网发电，刷新了国内海上风电单机容量新纪录。从风机制造企业的布局来看，8 MW成为新的起点，10 MW及以上大型海上风电机组已被列为重点开发机型。

（3）海上风电建设逐步由近海浅水走向深海深水

截至2019年底，全国累计核准海上风电总容量3 500万kW，其中，江苏、广东核准规模超过千万千瓦，福建、浙江核准规模超过300万kW，后续新的近海可开发资源有限，而我国深海可开发海域面积广阔，未来有望成为海上风电发展的重心区域。

海上风电场对于工业以太网交换机的硬件要求

海上风电场的风机和海上升压站都修建于远离陆地几十公里的海域，环境十分恶劣。对于设备，特别是核心通信设备的要求非常高，主要涉及可靠性、防盐雾、高低温和电磁干扰等方面，此外海上设备维护受制于天气、海域管制和船支派遣等影响，紧急维护和日常维护也变得格外困难，而且维护的时间不确定，这就对以太网交换机的稳定、可靠运行提出了极高的要求。

1. 可靠性要求

设备可靠性的几个重要指标。

（1）MTBF指标

工业以太网交换机产品最为看重的指标之一就是平均无故障时间（MTBF）。最通用的权威性标准是MIL-HDBK-217、GJB/Z299B和Bellcore，外资品牌的工业交换机产品大多采用美国MIL-HDBK 217F作为参考标准，并在研发和生产测试阶段使用HALT高加速寿命试验（Highly Accelerated Life Testing，HALA）和高加速应力筛选（Highly Accelerated Stress Screening，HASS）以验证产品的MTBF是否达到设计要求。工业以太网交换机产品的MTBF大多在20年以上，有些产品甚至达到50年以上。

HALT主要应用于产品研发设计阶段，对于暴露产品的潜在缺陷效果明显，是设计工程师提高产品可靠性的重要试验手段。

HASS是产品通过HALT得出操作或破坏极限值后在生产线上做高加速应力筛选。要求100%的产品参加筛选。其目的是为了使产品不存在任何隐含

的缺陷或者至少在产品还没有出厂前找到并解决这些缺陷， HASS就是通过加速应力方式以期在短时间内找到有缺陷的产品，缩短纠正措施的周期，并找到具有同样问题的产品。

（2）MTTR指标

海上风电现场通常要求平均故障修复时间（MTTR）由制造商提供，当不考虑管理辅助时间和运送时间时，一般为0.5～1 h，诊断（或检查）及更新故障插板时间应小于30 min。

一旦工业交换机出现硬件故障，如果不考虑管理辅助时间和运送时间，只是做简单的替换，那么绝大多数情况下，工业交换机产品是可以在1 h内完成替换工作的，达到客户对于MTTR的要求。

2. 防腐蚀性要求

海上运行环境的一个重要特点就是盐雾大，工业以太网交换机产品需提供电路板保护涂层设计，达到G3防护等级，完全符合ISA-S71.04—1985（classification G3- Hash Group A）和EN60068-2-60 Method 4标准要求，才能够在海上恶劣的外部环境下长期稳定可靠运行。

曾经有早期的海上风电场出现过成批量的交换机故障，打开交换机的机壳，肉眼可见电路板上有明显的灼烧痕迹。原因之一就是这批交换机没有使用防护涂层。

3. 高低温要求

由于不同的海上风电场处在不同的纬度，气候条件也千差万别。比如在冬季，大连庄河的海上风电场最低气温可以达到－15 ℃，而在夏季，湛江徐闻的海上风电场最高气温可以达到38 ℃，风机塔筒内的温度可能比室外气温更高。因此对于工业交换机的正常工作温度提出很高的要求。

虽然市面上大多数工业交换机厂家的样本中，都会标出交换机的工作温度为－40～70 ℃，甚至是－40～85，但是这一数值是来源于实验室的短时间测试。以国内某权威测试机构的测试要求为例，高温环境的技术要求为：交换机在通电状态下放入环境试验箱中央，温度升高至70 ℃后保温2 h。装置在70 ℃环境下能正常工作，存储转发速率应能达到100%。如果满足此要求，即判定为合格。

低温环境的技术要求为：交换机在通电状态下放入环境试验箱中央，温度降低至－40 ℃后保温2 h。装置在－40 ℃环境下能正常工作，存储转发速率应能达到100%；低温－40 ℃下应能正常启动。如果满足此要求，即判定为合格。所以测试只是验证了在此极端温度下能否稳定运行2 h。

虽然海上风电场中的工业交换机不需要承受如此极端的温度，但需要在恶劣的温度环境下长期不间断运行，甚至会叠加其他外部环境的不利影响。只有经过时间检验的工业交换机才能满足海上风电场的高低温要求。

我国海上风电场的典型通信方案

整个海上风电场的“大脑”是位于陆上集控中心的一体化监控管理平台。该平台以陆上升压站的核心交换机为核心主节点，采用以太网星形拓扑结构，基于TCP/IP网络协议，通过传输链路层网络与现场各生产子系统相连。

现场生产子系统有升压站计算机监控系统、风机计算机监控系统、视频安防监控系统、箱变监控系统、设备状态在线监测系统、海缆综合监测系统和直流系统等。由于后4个子系统的组网方式非常简单，在这里就不再详细展开。

1. 升压站计算机监控系统网络通信方案

一般来说，一个海上风电场会同时拥有一个陆上升压站和一个海上升压站，每个升压站分别配置一套计算机监控系统，该系统采用分层分布式结构，网络结构为双网配置，在陆上升压站配置双远动主机，海上升压站监控系统作为子系统纳入陆上升压站计算机监控系统，在陆上升压站通过计算机监控系统直接向调度端传送远动信息。海上升压站平台至陆上升压站之间设置有海底光电复合缆及SDH（2.5 G）光端机，用于海上升压站至陆上升压站之间的信息传输。

现场的风机会组成若干个环网，通常是6台风机组一个环，每个环网中有一台交换机与海上升压站的汇聚交换机相连。升压站计算机监控系统网络拓扑如图4所示。

2. 风机计算机监控系统网络通信方案

风力发电机组的保护和监控设备随风力发电机组配套提供，采用集中监控方式，设置风机计算机监控系统，用于风力发电机组的自动监视和控制，可以实现对海上风力发电机组的遥信、遥测和遥控功能。

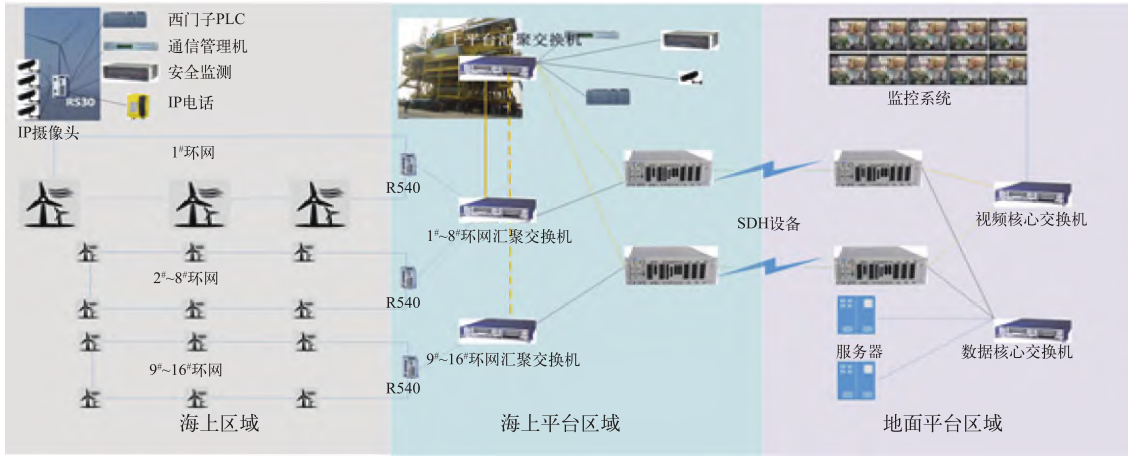

图4　升压站计算机监控系统网络拓扑图

风机计算机监控系统如图5所示。图5中汇聚交换机的多个电口，用于连接海上风场现场各系统业务的监控服务器，包括风机机组SCADA服务器、IP电话服务器、CMS在线振动监测服务器和WPPM功率平台服务器等。汇聚交换机的光口用于与塔基控制柜内的工业以太网交换机组成光纤环网。

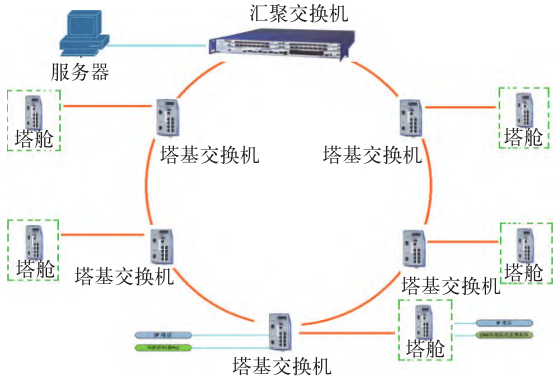

图5　风机计算机监控系统网络拓扑图

塔基控制柜内的工业以太网交换机（见图6）除了与汇聚交换机组成光纤环网，还需要多个百兆电口用于连接塔底处风机控制器、IP电话等业务。另外一个百兆光纤接口直接连接机舱控制柜里的工业以太网交换机的百兆光纤口。

图6　塔基控制柜内的工业交换机安装图

机舱控制柜内的工业以太网交换机的多个百兆电口用于连接机舱处CMS在线振动监测系统、IP电话等业务。再通过一个百兆单模光纤接口连接至塔基控制柜里的百兆级联单模光纤口。

3. 视频安防监控系统网络通信方案

风力发电机组大多工作于恶劣的自然环境下，风机分布地理位置较为分散，且风机机舱位于近百米的高空之中，不利于维护人员巡查和管理。随着技术的发展，视频监控以其直观、准确、及时和信息丰富等特点，得到广泛应用。将视频监控引入风力发电机组，可以提高风机运行的安全性和运行维护的便利性，同时提高风机监控的信息化水平。

视频监控系统主要监控机舱、塔基内外部和风机周围等位置的设备运行状态与人员的作业状态，确保设备和人员的安全。监控系统利用备用光纤组成环网，并将数据传回海岛升压站及陆上升压站，监控中心可进行实时预览和录像回放。

摄像机和接入交换机安装在风机内，接入交换机将摄像机采集到的视频信号通过光纤环网接入位于海岛升压站的汇聚交换机，再由汇聚交换机通过海底光缆点对点地传送到位于风电场集控室内的核心交换机，最后由核心交换机传输到视频监控后台以及流媒体服务器和管理服务器，如图7所示。

每台风机机舱内安装两套图像监视设备和一台工业交换机，用于监视机舱内各设备的运行状态；每台塔架内底部安装一套图像监视设备和一台工业交换机，用于监视塔架底部设备的运行状态，可通过云台控制球机转动，对塔架底部所有设备进行全方位监控，如图8所示。

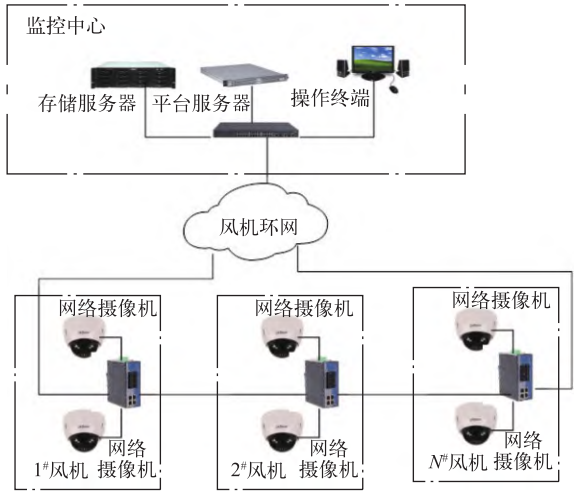

图7　视频监控整体架构拓扑图

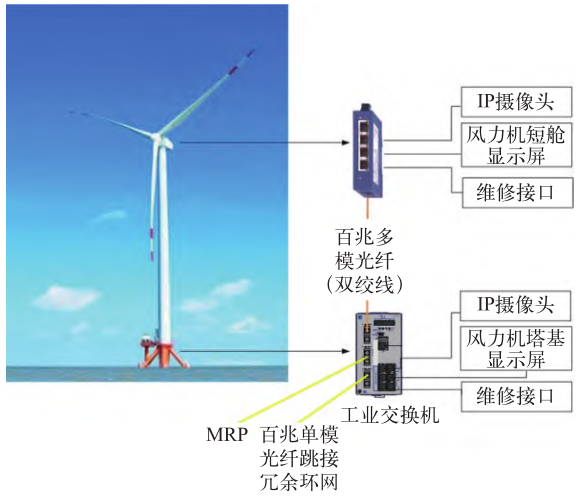

图8　视频监控系统中的接入交换机

目前海上风电场通信网络存在的问题

由于通信系统在整个海上风电场所占的比例微乎其微，一般不易引起业主的足够重视，海上风电场的安装任务非常繁重，且时间窗口很短，调试阶段往往能通信上就行，没有对交换机做任何配置。加之通信知识比较专业，风场的技术人员普遍对通信网络了解甚少，紧急情况下很难正确判断和解决故障。此外由于海上风电场子系统很多，所用交换机往往不只一个品牌，日常维护也会力不从心。

1. 潜在的网络风暴风险

很多风电场运行的核心交换机是默认配置，调试人员没有在风电现场根据实际情况配置虚拟局域网（VLAN），导致广播可以在整个风电场内传播，进而引发广播风暴。这个问题在风机监控系统中尤为突出，所有塔基控制柜内的工业交换机在同一个子网中，广播域过大，极易引发广播风暴。

2. 汇聚交换机单点故障的风险

在部分运行的风电场中，存在升压站监控系统或风机监控系统是单网的情况，一旦海上升压中的汇聚交换机出现故障，这台汇聚交换机所在的子系统会面临整个网络瘫痪的风险。

3. 子系统和交换机品牌太多，不利于后期维护

现场生产子系统很多，每个子系统的厂商也不一样，交换机往往不只一个品牌。此外一个海上风电场通常会分成几期建设，第一期和第二期的风机制造商往往不是一家，风机监控系统和系统内的工业交换机产品也不一样。这么多子系统，这么多交换机品牌，投运以后现场的运维会非常困难。

新一代海上风电场的组网方案展望

在国家开发利用可再生能源的政策推动下，近些年以来，我国海上风电产业蓬勃发展。风机新机型的研发和投产也在持续向前推进，但是通信网络还是沿用多年以前的组网方案，已经无法满足当前风场通信的要求，且存在诸多问题。如何构筑一个新的高可靠、长期稳定运行的网络传输平台就显得尤为重要。

国外的同行早在几年以前就着手研究新一代的风电场组网通信方案了，所以对于我们而言，时间上非常紧迫。

1. 新一代海上风电场组网方案的建议

对于新一代海上风电场，建议将风机监控系统和视频监控系统的通信网络合并。网络架构仍然采用三层模型设计，即接入层、汇聚层和核心层。接入层的塔基交换机采用千兆级联快速以太网交换机，使用千兆单模光口组网，最终与海上升压站的汇聚层交换机组成环网，该环网为双网结构。机舱交换机依然选用全百兆交换机，通过百兆多模光纤与塔基交换机相连。接入层网络以风机为单位划分VLAN来隔离各个风机，缩小广播冲突域。汇聚层交换机放置于海上升压站，采用两台全千兆两层工业交换机，最好能支持堆叠功能。核心层交换机放置于陆上集控中心，采用两台全千兆三层交换机，最好能支持堆叠功能。新一代海上风电场的网络拓

扑如图9所示。

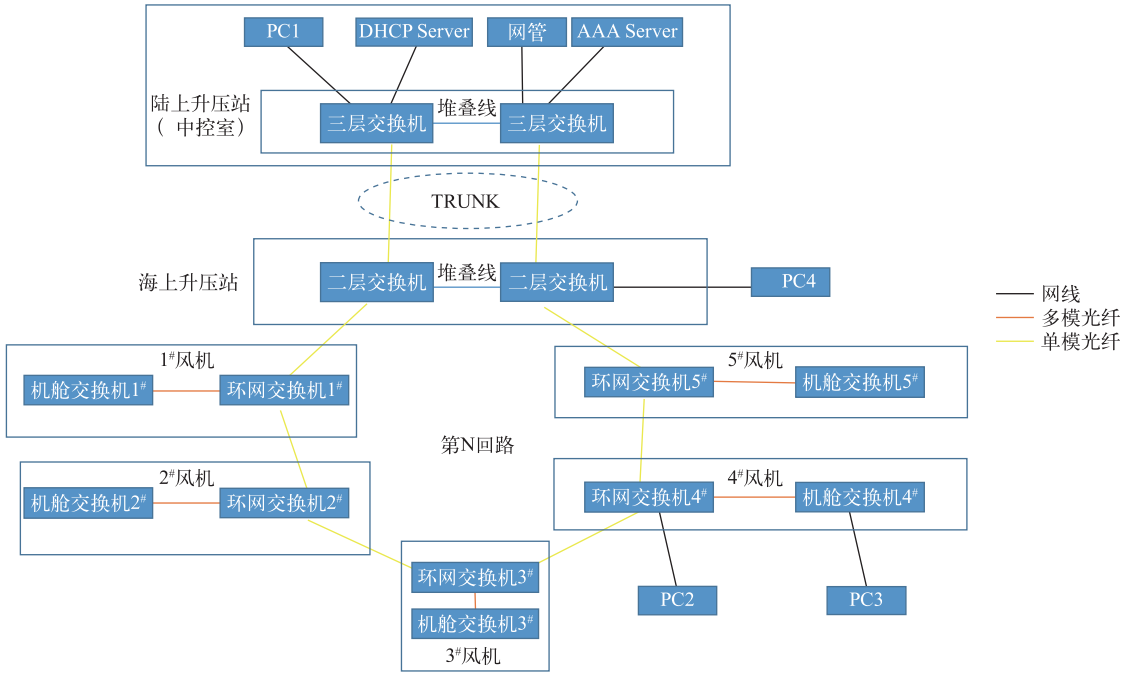

图9　新一代海上风电场的网络拓扑展望

2. 新一代海上风电场组网方案的优点

（1）避免网络风暴的潜在风险

风机监控系统的通信网络原来是一个大的子网，现在分成若干个子网，再加上VLAN的划分，极大程度上缩小了广播域，有效地避免了网络风暴的产生。

对于VLAN的划分，可以是一个回路一个VLAN（子网），支持一个回路按业务单独划分一个VLAN（子网），交换机在一个回路中也支持单独划分一个VLAN（子网），中控室作为一个特殊风机划分一个子网。

（2）合并通信网络以节约成本、提高可靠性

将风机监控系统和视频监控系统中的通信网络合二为一，可以减少交换机的数量，不但节约了成本，而且减少了安装调试和后期维护的工作量。塔基和机舱内的交换机完全可以胜任接入风机监控业务和视频监控业务的工作。此外塔基交换机用千兆环网组环后，提高了通信的带宽。由于是双环网结构，也避免了汇聚交换机单点故障的潜在风险。

（3）标准化网络设计便于后期维护

汇聚交换机和核心交换机须支持堆叠技术，可以简便地对现场交换机端口做出扩充。堆叠技术的好处在于将一组交换机作为一个对象来管理，为用户提供简化的管理和操作。由于大多数海上风场需要分几期进行建设，使用支持堆叠技术的交换机后，在新上二期或三期的系统时，只需要堆叠新的汇聚交换机和核心交换机即可。避免新上二期或三期的风机和视频监控系统的核心交换机与一期品牌和型号完全不一样，也无法接入一期的风机和视频监控系统中。标准化网络设计后，同一个风电场内，除升压站监控系统外（升压站监控系统须居接入安全I区和安全II区，有特殊要求），其他子系统的工业交换机型号可以固定成3～4个型号，对于后期现场维护、备件准备和故障处理都是非常有帮助的。

结束语

当下，工业智能化的建设正在如火如荼地展开。风电行业，特别是海上风电行业的自动化、信息化程度较高，基础较好，但是与真正意义上的“智能化风电场”还有一定的差距。打造健康、稳定、可靠和可扩展的新一代通信网络是智能化风电场的基础工作，也必将助力海上风电产业实现新一轮的腾飞。EA