

国际离岸风力机业者之智慧制造与创新策略

文 | 林子钦 · 金属工业研究发展中心 企划推广处 产业研究组

因应全球净零排放浪潮以及欧美碳边境调整机制的趋势，能源转型已不仅是环保问题，更进一步成为影响产业在全球市场竞争力的重要经济议题。离岸风电作为重要的再生能源之一，全球各国均致力发展离岸风电，也进一步推动了该产业的增长和创新。目前全球累计的离岸风电装置容量已达约 60GW，世界各国也制定了相应的发展目标。

根据 Wood Mackenzie 的统计，截至 2022 年，全球离岸风力机的总订单量已超过 118.2GW。目前欧洲的风力机系统商西门子和维斯塔斯 (Vestas) 是全球离岸风力机的领导厂商，占据了订单量的前两名。然而，中国的离岸风电市场也在快速增长，而且中国品牌的风力机系统商也正逐步提升其产品规格与技术能力。尽管在短期内无法动摇欧美风力机系统商的领导地位，但随着中国政府大力推动再生能源政策，中国市场正在蓬勃发展，这促使

西方国家的风力机系统商除了不断开发下一代超大型风力机外，还迫切需要优化生产流程、降低供应链成本，以提高竞争力。

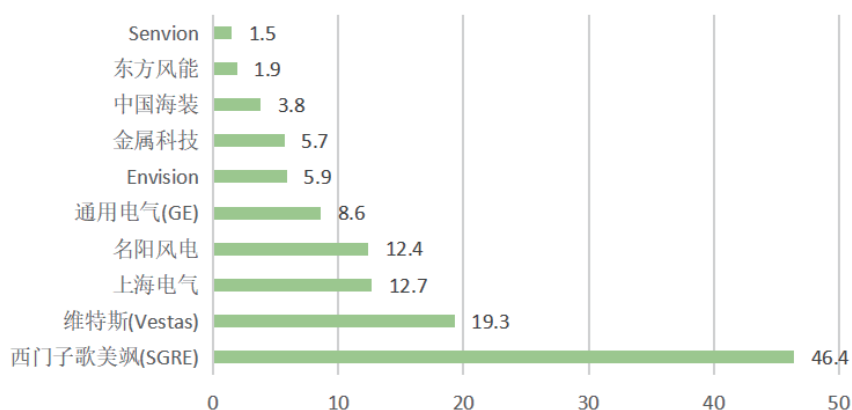
面对全球离岸风电市场日益激烈的竞争，国际间的风力机系统商正快速朝智慧化、自动化和无人化的方向发展。无论是欧美的领导厂商如 SGRE 和 Vestas，还是正在迎头赶上的中国厂商如上海电气、明阳风电，均已逐步引入人工智能、大数据分析、机器学习、物联网技术、云端计算以及数位双生等

先进技术。透过这些智慧化技术的应用，不仅能提高产能，更能有效提升产品质量，进一步强化其在全球市场的竞争力。

离岸风力机机舱组装与叶片制造业现况与工作痛点

在风力机机舱组装方面，风力机运转时需经过许多电子系统和模块的转换，使风能可被转换为电能，并传输到电网供使用。因此风力机机舱内部存在许多电子系统及模块化机柜。而这些机柜的组装通常仰赖技术人员在产在线将

1 累计至 2022 年底全球离岸风力机总订单量 (GW)



数千种材料组装，并将电线接线在正确位置，执行组装作业时需同时参考数百页的纸本说明文件。不但来回翻阅浪费时间之外，当制程优化或工序改变时，往往无法快速更新该文件。为改善制造流程、提高生产效率、降低制造与时间成本，风力机机舱组装的智慧化技术趋势，多半朝向头戴式装置、扩增实境 (AR) 辅助技术等可提升技术人员组装作业效率之智慧化技术。以下整理机舱组装之执行工作痛点：

信息查阅耗时

在进行机舱组装工作时，由于工序复杂及零组件多，难单靠工作人员记忆来执行。现状下员工需在数百页的纸本文件或平板中来回查找信息，造成时间的浪费。

工作错误率高

由于制程的复杂性，人工操作中容易发生失误，需要找到方式来降低这些错误的发生。

新员工培训时间长

新员工需要花费大量时间熟悉工作流程，这延长了他们达到工作效能的时间。

双手无法操作

员工在产线工作时需要双手使用工具，如在叶片制程中，工人双手常会沾满树脂或碳纤维，导致无法顺利翻阅纸本文件或操作平板。

信息更新不同步

传统纸本文件或平板的信息更新耗时，且难以确保全球各地工厂能够同步更新至最新的规范与标准。

制程透明度不足

目前缺乏实时记录和拍摄制程的方式，导致生产和检验过程的透明度不足。

远端专家指导困难

目前专家需亲自前往现场进行指导，不仅耗时，且在疫情期间可能会阻碍工作的进行。

在风力机叶片制造方面，其制程通

常仰赖大量人力，属于相对劳力密集型的产业。再加上离岸风力机大型化的趋势，叶片的尺寸日益增加，目前 Vestas V236-15MW 离岸风力机型之叶片长度已达到 115.5 公尺，导致制造上的困难与挑战遽增，产生如叶片合模时定位校正困难或非破坏性检查耗时等问题。以下整理风力机叶片制造之执行工作痛点：

制造错误率高

在叶片制程中，由于人工作业可能导致材料位置错放，从而影响叶片的生产质量，并引发高昂的修复成本。因此，有需要寻找方法以降低制造异常的发生。

异常警示不足

在叶片生产过程中，工作人员如果错放位置或叶片表面出现缺陷，目前并无实时的警示机制来修正这些错误，这可能导致制造成本的上升。

缺乏优化分析

目前并无足够的影像数据来进行机器学习的训练，导致模型的精准度及制程优化的效率有待提升，这也影响了降低制造成本的效能。

国际离岸风力机系统商制造智慧化应用案例

离岸风力机机舱组装应用案例

1) Vestas 利用头戴式装置优化机舱组装工序。

为改善制造流程并除去工作人员于组装作业中来回比对的时间浪费，Vestas 与 Transition Technologies PSC 合作，利用 Skillworx 系统协助工作人员提升机舱组装作业效率。

Transition Technologies PSC 是一间波兰数位转型技术服务商，在数位转型领域上拥有丰富知识与经验。

SkillWorx 系统使用 RealWear 之工业用 HMT-1 头戴式装置，可以免持、可视化的方式直接在工作人员眼前的眼镜荧幕上显示工作说明、生产订单、检查清单、拣货清单、标准操作程序、转换信息等，并可读取不同格式的文件内容 (PDF、2D 图像、Creo View 3D 文件和影片)，甚至在能见度较低的环境下，能以语音朗读内容以协助人员执行工作。

2) 通用电气 (GE) 利用 AR 技术增加生产效率。

GE 与 UpSkill 合作，应用其 Skylight 系统协助风力机系统模块组装的工作人员增加组装效率。Upskill 是一间美国 AR 软件开发商，自 2010 年建立以来，持续耕耘穿戴、移动设备的软件开发领域，2021 年 3 月被全球远端连线系统与数字化技术领导厂商 TeamViewer 收购。透过 Skylight 系统，协助其工作人员在进行风力机系统模块组装中提升效率、减少来回确认的工作时间。如在电力系统机柜的布线 (wiring) 工序中，利用智慧眼镜与 Skylight 系统，可在工作人员智慧眼镜中说明工作流程并显示布线位置，结合语音指示繁复的组装工序，取代以往以纸本文件或平板计算机来回确认任务步骤的做法。根据 GE 统计平均可缩短工作人员 34% 的组装作业时间。

离岸风力机叶片制造产业痛点与应用案例

1) SGRE 与丹麦科技大学、F O

R C E Technology 合作开发叶片扫描机器人。

由于叶片尺寸极大，在执行非破坏性检查时若采人工作业，速度极慢且可能产生误差，最终导致额外的修补工作。SGRE 和丹麦科技大学 (Denmark Technical University, DTU)、丹麦技术开发商 FORCE Technology 合作开发了一种用来扫描风力机叶片表面的自动化解决方案，可在风力机叶片成品产出后，在出厂前透过该机器人技术扫描叶片表面，以提升检查质量和效率。

FORCE Technology 是成立于 1940 年的丹麦技术咨询和服务商。为解决上述叶片制造的问题，FORCE Technology 开发一套自动叶片扫描机器人，使用红外线光扫描叶片表面，可掌握所有表面缺陷的重要信息，并可利用该信息进行精准修补和模具优化。该技术历经多次改良，从初始在叶片表面爬行的机器装置逐步进化至站立式单面叶片扫描及阵列扫描机器装置，最终在与 SGRE 及 DTU 的合作下，成功开发 360 度全自动叶片扫描设备，除在 FORCE Technology 的实验室中建置及测试外，还在 SGRE 位于奥尔堡 (Aalborg) 的叶片厂进行实际测试。

2) SGRE 结合 IoT 与机器学习技术协助叶片制造。

传统叶片制程中，工作人员需将纤维层逐层黏贴至叶片表面，人工执行时的位置误差，将导致叶片制造质量的缺陷，执行工作时的任何位置偏差，都可能导致叶片出现缺陷，并需要昂贵且耗时的修补过程。为解决此问题，SGRE 数位实验室 (Digital Ventures

Lab, DVL) 已于 2020 年 7 月与 IBM Services 合作，建立一套叶片辅助生产解决方案。透过在机器手臂上所安装的摄影镜头，结合物联网 (IoT) 技术与机器学习技术，将拍摄画面运算、分析后，在叶片表面上投射网格雷射光，指引工作人员直接辨认材料摆放位置，藉此提高叶片制造的精准度与效率。此方法工作人员可直接在表面上看见每片玻璃纤维层应该摆放的位置，无须再人工量测或辨识。

若制程中检测到任何错误或异常，亦可立即回传并发出警示反映给制造中心，避免后续发生错误的连锁效应。同时，相机所拍摄到的每张图像，均会利用机器学习技术持续分析，进而累积数据并不断提升精准度，藉此降低制造错误率并改善未来的叶片生产模具。

结论与建议

离岸风力机机舱组装

随着风力机制造业在全球的竞争日益加剧，智慧化技术的应用成为提升制程效率、减少错误率并优化产线的重要工具。尤其在风力机机舱的组装过程中，数千种零组件和繁复的电子系统都需要经过精确的制程和严谨的检验。头戴式装置与 AR 技术的应用，能实时提供现场工作人员操作指引，不仅能节省信息查阅时间，也能降低人为失误，并有助于新员工的培训。此外，透过录制熟练工人的操作过程，新员工能够更快地学习和适应工作流程。同时，头戴式装置还能实现双手自由，解放技术人员的双手去操作工具，避免因操作平板和查阅文件而分散注意力。此外，这些装置的

实施也有助于知识的传承和记录，确保优秀的工作流程和经验能被持续保留并传递给新一代的工作人员。当制程变更或标准更新时，透过这些装置能迅速同步信息，确保全球各地工厂达到统一的操作标准和最新规范。在品检方面，该类技术亦可以提高生产与检验过程的透明度，并可进行远端专家指导和监控，减少专家亲自到场的需求并确保生产工作在各种情况下，包括疫情期间，都能确保工作持续进行。

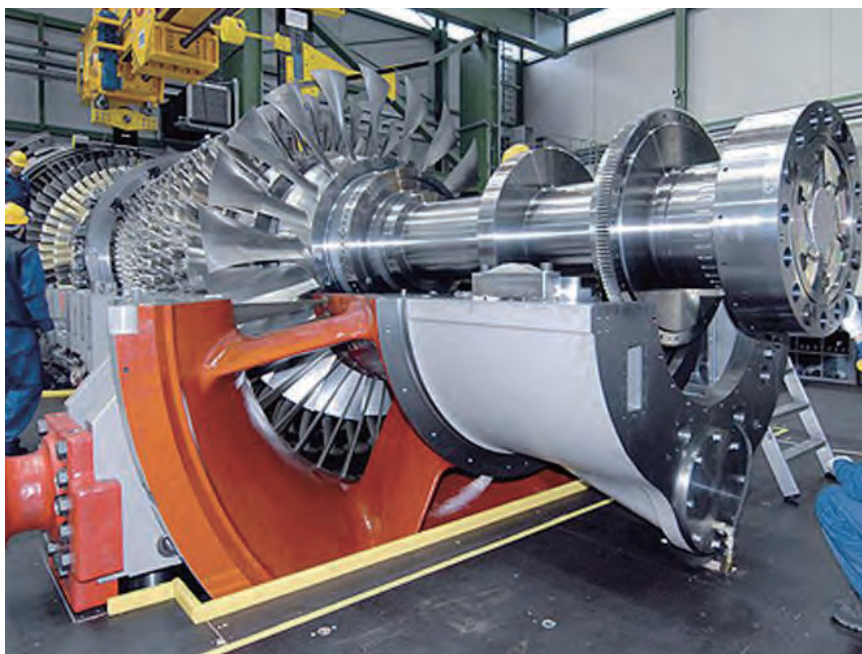
离岸风力机叶片制造

随着风力机叶片尺寸的增加，制造过程中的挑战和困难也相应增加。为应对这些挑战，越来越多的制造商选择导入人工智能、物联网和自动化机器人技术，以提升生产效率和降低成本。该类技术的应用，可有效降低因人为错误导致的叶片生产质量异常，进而减少修复成本。例如，工作人员在生产过程中如果错误放置材料，系统可透过物联网技术和摄影装置，经人工智能分析后指引正确的布放位置，人员布放位置错误时也可即时发出警报，及时纠正错误，有效降低生产中的错误率。

此外，这类技术还能透过大数据和机器学习对生产过程进行优化。透过不断搜集和分析影像数据，进行深度学习，逐渐提升精确度，并在未来的生产和模具制造中，改善叶片制造的缺陷、提升叶片生产的质量。

建议

观察国际风力机制造商通常与当地现有技术开发商 (AR 等) 合作。根据执行组装工作的情形，目前朝向以穿戴装置、扩增实境等技术来辅助工作人员



为主要发展趋势，我国在 AR 技术实已具备硬件开发及系统整合能力，导入 AR 技术于离岸风电零组件制造领域颇具潜力。目前国际大厂如 SGRE、Vestas(KK Wind Solution) 等已来台设机舱系统组装厂，不过因风力机制造商基于技术保护，通常对于外部技术的导入会相对封闭，因此初期可能仍以引进国外设备为主，但随着未来在地化生产的需求成长以及成本考量，仍有机会导入国内设备。短期内，我国业者可先针对周边生产设备、移动设备或吊具等方面切入。国际风力机叶片智慧化制造技术则多采用自动化设备、人工智能、机器学习与物联网技术来协助现场工作人员叶片制程中的定位。我国叶片制造业者如天力，虽制程中已导入红外线定位，但工厂仍处初期学习阶段，生产设

备、流程与技术仍须依其策略合作伙伴 Vestas 之标准执行。

另外，在叶片制造方面，国际叶片制造商多采用自动化设备，结合 AI、大数据、机器学习与物联网等技术，来协助现场工作人员提升叶片生产过程中定位的精准度。目前除我国业者天力以外，SGRE 亦将在台投资设叶片厂。整体而言，本土业者因是以 OEM 模式为主，与外国业者有类似的情况，短期内应仍以国外设备为主，如设备业者提前布局，未来将有机会逐步导入本地的设备和技术。不过由于叶片生产上仍处初期学习阶段，若导入先进的定位或检测设备，可再精进其叶片生产良率与产能。MFC