第 52 卷 第 3 期：1013-1034 高电压技术 Vol.52, No.3: 1013-1034
2026 年 3 月 31 日 High Voltage Engineering March 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250725

大型风电机组能量转换系统服役性能提升技术综述

黄守道[1,2]，屈尹鹏[1,2]，高　剑[1,2]，刘　晓[1,2]，黄科元[1,2]，吕铭晟[1,2]，廖　武[1,2]
（1. 湖南大学电气与信息工程学院，长沙 410082;
2. 海上风力发电装备与风能高效利用全国重点实验室，长沙 410082）

摘　要：大规模安全高效开发利用风能对推进国家能源转型意义重大，大型风电机组是实现风能开发利用的核心装备。风电机组的能量转换系统是由叶片、发电机系统(含发电机、变流器和传动装置等)构成的风-电能量转换中枢，同时也是风电机组中服役故障发生率最高的系统。随着风电机组单机容量的不断增大，其服役性能也需要满足更高的要求。该文首先分析了大型风电机组能量转换系统服役性能提升的内涵；其次，从运行安全性、运行保障能力、运行效率 3 个方面，系统阐述了现有大型风电机组能量转换系统服役性能提升技术；最后，根据大型风电机组发展特点，结合人工智能、数据驱动等新兴技术，对未来大型风电机组能量转换系统服役性能提升技术的发展趋势进行展望。

关键词：风力发电；风电机组；能量转换系统；服役性能；运行安全性；运行保障能力；运行效率

Review of Technologies for Service Performance Enhancement of Large Wind Turbine Energy Conversion Systems

HUANG Shoudao[1,2], QU Yinpeng[1,2], GAO Jian[1,2], LIU Xiao[1,2], HUANG Keyuan[1,2], LYU Mingcheng[1,2], LIAO Wu[1,2]
(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;
2. State Key Laboratory of Offshore Wind Power Equipment and High-efficient Utilization Wind Energy, Changsha 410082, China)

Abstract: The large-scale, safe, and high-efficiency development and utilization of wind energy is of great significance for advancing the national energy transition. Large-scale wind turbines are the core equipment for achieving the development and utilization of wind energy. The energy conversion system of a wind turbine refers to the wind-to-electricity energy conversion hub composed of blades and the generator system (including the generator, converter and transmission devices). It is also the system with the highest incidence of faults in wind turbines. With the continuous increase in the capacity of wind turbines, higher demands are placed on their service performance. This paper first analyzes the connotation of enhancing the service performance of the energy conversion system in large wind turbines. Next, this paper systematically elaborates on the existing technologies for improving the service performance of the energy conversion system in large wind turbines from three aspects, namely, operation safety, operational support capability, and operational efficiency. Finally, based on the development characteristics of large wind turbines and incorporating emerging technologies such as artificial intelligence and data-driven approaches, this paper provides an outlook on the future development trends of technologies for enhancing the service performance of the energy conversion system in large wind turbines.

Key words: wind power generation; wind turbine; energy conversion system; service performance; operation safety; operational support capability; operational efficiency

0　引言

风电作为我国能源转型的传统主战场之一，其平稳高效的发展是我国实现“双碳”目标的重要保障[1]。据全球风能理事会(Global Wind Energy Council, GWEC)发布的《2025 年全球风能报告》显示，2024 年全球风电新增装机容量达到 117 GW，创历史纪录，累计装机容量达到 1 136 GW，相比 2023 年增长 11%。其中，我国风电新增装机容量占全球新增装机容量的近 70%[2]，成为全球最大的风电市场。由于大型风电机组可以大幅增加发电量，节约点位资源，因此在风电总装机容量不断增长的同时，单机容量也在迅速上升，截至 2024 年，我国

基金资助项目：国家重点研发计划(2024YFB4205800；2023YFB4202800)；国家自然科学基金(52207051)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2024YFB4205800, 2023YFB4202800), National Natural Science Foundation of China (52207051).

5.0 MW 及以上风电机组的累计装机容量占比达33.8%，同比增长 11.3%[3]。

过去 20 年我国风电机组技术取得了举世瞩目的成就，但在机组服役性能提升技术方面却相对发展缓慢，难以适应风电机组技术的发展，导致风电经济性受损、电网安全与消纳压力增大，对风电产业的可持续发展造成系统性、多层次的影响。大型风电机组服役性能不佳主要原因包括以下几点。

1）技术迭代速度快。为了追求更低的度电成本和更高的发电效率，风机技术在短时间内经历了快速迭代——叶片更长、塔筒更高、单机容量更大，这种快速迭代使得潜在问题在实验室和短期测试中难以暴露，导致服役过程中故障频发。

2）载荷非线性增长，系统复杂性剧增。大型风电机组受到的风剪切、湍流和波浪(对于海上风机)载荷更大；而机组自身零部件数量增多，耦合性急剧增加，关键部件的损伤极易传导并放大为整个系统的故障。

3）运行环境更加恶劣。大型风电机组大多服役于海上，要面临盐雾、高湿度、台风等严苛的运行环境；且海上风电机组可达性差，恶劣海况导致其可维修窗口期短，运维响应慢。

因此，大型风电机组服役性能提升成为当前中国乃至全球风电产业从“规模扩张”迈向“高质量发展”的关键。“十四五”以来，我国大型风电机组服役性能提升技术逐步得到重视，科技部先后启动了多个国家重点研发项目支持该技术的研发，取得了显著的成效[4]。

风电机组的能量转换系统主要由叶片和发电机系统(含发电机、变流器和传动装置)等关键零部件构成，是实现风-电能量转换的“心脏”和保障电能高质量并网的“中枢”，同时也是机组服役故障发生率最高的系统[5]。因此，提升大型风电机组能量转换系统的服役性能成为近年来学术界和工业界的研究热点。

本文总结了近年来国内外学者、研究人员在大型风电机组能量转换系统服役性能提升技术方面的研究成果。首先，阐明了大型风电机组能量转换系统服役性能提升技术的内涵；其次，从运行安全性、运行保障能力和运行效率 3 个方面阐述了大型风电机组能量转换系统服役性能提升技术；最后，结合人工智能、数据驱动等新兴技术和风电发展的需求，对未来技术发展趋势进行了展望。

1 大型风电机组能量转换系统服役性能提升技术内涵

1.1 大型风电机组能量转换系统服役性能提升技术内涵

大型风电机组能量转换系统服役性能提升技术是指在能量转换系统设计、制造、安装、运行与维护全生命周期中，为克服其固有挑战、优化其运行性能而发展起来的一系列综合性技术。

能量转换系统服役性能提升技术的目标是在保证安全可靠的前提下，最大化机组在全生命周期内的发电收益(可利用率与发电量)，最小化度电成本，并提升对电网的友好性，具体可分为以下 3 个层次。

1）保障系统可靠性与安全性。减少非计划停机，提升可利用率，这是一切发电收益的根基。

2）提升机组经济性与发电效能。通过增加发电量(提升效率、减少损耗)和降低运维成本(预测性维护、减少大修)最终降低平准化度电成本，这是一切风电项目的核心和关键。

3）增强机组电网适应性与环境友好性。使风电机组不仅是电源，更是支撑电网稳定运行的“友好型设备”，这是实现资源循环和可持续发展的必要前提。

总而言之，大型风电机组能量转换系统服役性能提升技术是一项系统性工程，它通过“优化设计—智能运行—预防维护”等先进技术和手段，从根本上破解风电机组大型化后带来的性能与可靠性矛盾，确保风电作为主力能源的长期竞争力与生命力。

1.2 大型风电机组能量转换系统服役性能提升技术综述框架

大型风电机组能量转换系统服役性能提升技术种类繁杂、手段丰富、目标层次各异，本文选取目标驱动技术发展的综述角度，从运行安全性、运行保障能力和运行效率提升 3 个方面进行阐述。

大型风电机组能量转换系统运行安全性提升技术主要包括对发电机系统和叶片等关键部件的材料、构型和控制策略等进行优化，提高其在短时剧烈冲击和长期复杂服役环境影响下的稳定运行能力，是大型风电机组能量转换系统服役性能提升的基础。

大型风电机组能量转换系统运行保障能力提升技术通过状态监测、故障诊断、运维优化等技术，

在复杂服役环境下最大化系统的可用率，从而提升平均无故障运行时间，是大型风电机组能量转换系统服役性能提升的保障。

大型风电机组能量转换系统运行效率提升技术在对系统整体运行损耗分析评估的基础上，通过系统集成设计和优化控制，提高其在复杂服役环境下的发电效率，是大型风电机组能量转换系统服役性能提升的核心。

提升关键部件的运行安全性拓展了系统的可靠运行边界，提升运行保障能力则能够最大化系统在可靠运行边界内的运行时间，而提升运行效率则可在最大化机组发电时间的基础上进一步提高系统的发电量。

如图 1 所示，大型风电机组能量转换系统的服役性能提升技术能够提高机组在面对复杂环境时的系统稳定性和容错运行能力，以及风电机组全生命周期内的经济效益，实现机组发电量、运行维护成本、机组寿命之间的最佳平衡。综上所述，提升大型风电机组能量转换系统服役性能对于促进我国风电行业从“粗放型建设”向“精细化运营”、从“追求初始投资最低”向“追求全生命周期价值最高”的根本转变具有重要意义[6]。

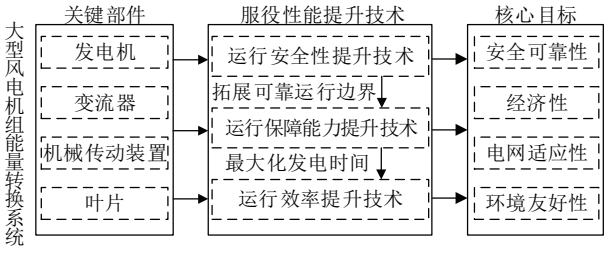


图 1　大型风电机组能量转换系统服役性能提升技术

Fig.1　Technologies for service performance enhancement of large-scale wind turbine energy conversion systems

2　大型风电机组能量转换系统运行安全性提升技术

大型风电机组能量转换系统运行安全性指系统在发生内部故障或遭受外部极端事件(如极端风速)时，能够进入并维持在一个受控的、非灾难性状态的能力，直接决定了系统的可靠运行边界。通过严格的安全性分析和有效的设计与控制技术，能够显著提升大型风电机组能量转换系统运行安全性。

2.1　大型风电机组能量转换系统运行安全性分析方法

大型风电机组能量转换系统运行安全性分析方法主要通过对关键零部件的风险分析与建模仿真等[7]，分析复杂服役环境下不同因素对安全性的影响，为大型风电机组能量转换系统运行安全性提升设计与控制技术提供理论支撑。

在风险分析方面，现有研究通常采用“系统分解—失效后果分析—重要度排序”的层级化思路。五凌电力有限公司的技术人员引入模糊综合评价方法，综合考量失效概率、失效后果及维修特性，指出叶片、发电机及齿轮箱因维修周期长、经济损失大而呈现高风险等级，变流器等电气部件虽单次维修快，但高频故障带来的累积安全影响亦不容忽视[8]。随着机组向大型化发展，外部环境载荷对安全性的影响日益凸显。洛桑联邦理工学院研究者指出，叶片旋转过程可能改变雷电放电路径，传统基于下行闪的评估方法可能会低估实际受击风险，所以需要将外部灾变载荷纳入统一建模[9]。

在物理建模层面，能量转换系统的退化与失效本质上是气动、机械、电磁及热环境等多物理场耦合作用的结果。针对单一载荷模型难以真实反映复杂工况的问题，学界逐渐转向随机建模与失效机理相结合的研究路径。华北电力大学的研究人员构建了考虑自然退化与随机冲击的竞争失效模型，验证了引入极端天气冲击过程后，可靠性评估结果更符合工程实际的情况[10]。在电能变换环节，兰州交通大学的学者研究了风速与环境温度波动对变流器绝缘栅双极晶体管(insulated gate bipolar transistor，IGBT)模块的寿命影响，指出忽略子模块间的寿命相关性将导致系统可靠性被高估[11]。内蒙古工业大学的学者进一步提出基于失效机理的多故障可靠性建模方法，利用连接函数(Copula)刻画了不同失效模式间的相关与竞争关系[12]。针对机械传动系统中主轴承载荷复杂、润滑失效频发这一难题，湖南大学研究人员探究了主轴承润滑损伤机理。该研究结合随机风场特性与气动弹性模拟，建立了考虑润滑脂非牛顿流体特性、表面粗糙形貌效应以及随机风载动态冲击的主轴承弹流脂润滑随机模型，揭示了外部随机风速波动对轴承内部油膜厚度及压力分布的动态影响规律；在此基础上，构建了主轴承润滑可靠性量化评估体系，克服了传统评估方法仅依赖经验统计的局限性，为复杂工况下主轴承的润滑寿命预测与失效风险评估提供了机理支撑[13]。

2.2 大型风电机组能量转换系统运行安全性提升设计技术

大型风电机组能量转换系统运行安全性提升设计技术主要包括发电机系统运行安全性提升设计技术和叶片安全性提升设计技术。通过模块化设计、拓扑优化和防护设计等技术，使得发电机系统在复杂、恶劣工况下具备更强的环境适应能力和抗失效能力，从而最大限度降低载荷冲击和故障风险；叶片运行安全性提升设计技术主要通过材料、构型的优化设计，提升叶片的防冰、防雷击和抗侵蚀能力。

2.2.1 发电机系统运行安全性提升设计技术

发电机系统作为机电转换的核心，其安全运行能力对于风电机组而言至关重要，主要包含发电机及变流器的优化和模块化设计、发电机系统的防护设计及机械传动装置的优化设计。

1）大型发电机优化与模块化设计

大型发电机转矩密度提升技术可减轻塔顶载荷，降低结构疲劳，降低制造成本；另一方面，发电机的分瓣模块化设计不仅可以便于安装和运维，还能提升发电机系统的冗余运行能力。

(1)提升转矩密度是在有限机舱空间内实现更高功率输出的主要手段。Halbach 阵列通过永磁体充磁方向的特定排列，产生自屏蔽效应，在无须增加转子铁芯厚度的情况下，使气隙侧的主磁通增强了约 1.4 倍，从而显著提升了转矩密度[14]。湖南大学研究人员利用定子侧的调制齿在气隙中激发出高频磁场分量，基于磁场调制原理实现了发电机“低速大转矩”输出[15]。然而，转矩密度的提升与功率等级的攀升，使得发电机定子侧电流急剧增加，若沿用传统的三相绕组结构，则定子侧的额定电流将高达数千安培，这对散热提出了极大挑战。因此，采用双三相、六相甚至十二相绕组结构进行功率分流成为解决这一瓶颈的关键技术[16]。多相系统不仅降低了单相电流幅值[17]，其在空间上的特定移相布局(如双三相间互差 30°电角度)，还能够利用谐波抵消原理，自动消除电磁转矩中的谐波分量。

(2)随着机组的大型化发展，大功率发电机巨大的物理尺寸也给运输与安装带来了机械层面的挑战。针对大型风机运输和安装困难的问题，采用定子分瓣技术将巨大的定子分割为多个独立的扇形模块。模块化设计不仅解决了运输难题，还允许在不拆卸整个机舱的情况下，在塔顶直接更换故障模块[18]。为了解决模块分块拼接处的磁路中断与气隙不均匀问题，常采用“E 型”铁芯单元或周向交错叠压工艺。此外，模块化设计可有效提升发电机的冗余运行能力，使得在一个模块失效时其他正常模块仍可以持续发电。

2）变流器拓扑优化与模块化设计

随着风电机组功率等级的快速增加，变流器的发展呈现出电压等级上升，模块数量增加的趋势。其主要目的是提升大功率风电电能变换的安全可靠运行能力。

(1)风电变流器的拓扑发展过程中，早期主要采用 380 V 和 690 V 低压两电平方案。三电平拓扑可将电压等级提升到 1 140 V 和 3 300 V 等级，从而降低大容量机组由于低压大电流带来的损耗，是目前的研究热点。三电平拓扑中有源中点钳位(active neutral point clamped，ANPC)拓扑与传统中点钳位(neutral point clamped，NPC)相比，通过在钳位路径上引入有源开关管，极大地丰富了开关状态组合[19]，使得控制器在某一开关管发生开路故障时，能够灵活选择替代的零电平路径来合成相同的输出电压矢量，从而实现“无缝”容错运行[20]。此外，ANPC 独特的损耗均衡控制可以主动平抑器件间的结温差异，从物理层面延长变流器的全生命周期寿命[21]，比传统 NPC 三电平变流器具有更好的可靠运行能力。

(2)为提高变流系统的可靠性、容错性、灵活性和功率扩展能力，多个变流器组成的多通道并联拓扑是目前大功率应用的主流方案。多通道变流器允许单个通道故障时，其他通道仍可继续运行，避免了因局部故障而导致整个风机停机，从而可显著提升可用率。华中科技大学研究人员将多个变流器模块并联，不仅解决了器件电流定额的限制，更提升了系统的冗余度[22]。除此之外，多通道并联型变流器可以根据风力发电的功率波动进行效率优化控制，在低风速时仅运行少数通道以提高效率[23]。对于并联型变流器，还需要关注变流器内部环流控制、多个变流器之间功率分配及多模块无扰切换工作等问题，以满足风电高效率、高稳定变流需求。

3）发电机系统的防护设计

随着机组大型化，发电机系统电压、电流等级不断上升，散热、绝缘等成为提升机组运行安全性的关键。其次，大型机组服役环境复杂，对设备的防腐蚀等防护性设计提出了更高的要求。

(1)在散热方面，为应对大功率带来的高损耗挑战，传统风冷散热技术已难以满足需求。发电机系

统的冷却方式正经历着从“风冷”向“高效液冷”的全面技术迭代。在发电机本体散热方面，针对海上等恶劣环境，全封闭循环冷却已成为主流方案。对于中速或半直驱机组，广泛采用全封闭空-水冷却技术，利用机座顶部的热交换器实现定转子内部热空气与外部循环水的高效换热，在保证防护等级的同时降低温升[24]。

在变流器散热方面，采用高效液冷板技术，通过在铝或铜质基板内加工微通道并通入冷却介质，有效降低了功率模块与冷却介质间的热阻。此外，基于相变材料和热管的高效热管理系统也开始得到应用，研究人员利用相变潜热缓冲瞬时热冲击，实现了紧凑空间下的高效换热[25]。

(2)在绝缘与防护方面，风力发电机长期承受全功率变流器高频脉冲宽度调制(pulse width modulation, PWM)产生的陡脉冲电压，且置身于高温高湿的海洋等恶劣环境中。电应力与环境应力的协同效应会加速绝缘老化，诱发局部放电甚至树枝化击穿[26-27]。通过采用耐电晕聚酰亚胺薄膜、纳米复合浸渍漆及增强型绝缘结构，能够提升绝缘系统耐受高频脉冲的能力。此外，针对高盐雾环境，除了多重防腐涂层外，正压通风系统与气隙油封技术被广泛集成于大型机组设计中，以防止盐雾侵入导致的电气短路与永磁体失磁风险[28]。

对于变流器的防护，由于其内部 IGBT 是实现能量变换和传输的核心器件，在海上等复杂服役环境下易发生腐蚀而导致模块失效，从而威胁机组的安全可靠运行能力。近年来，随着海上风电的发展，海上风电机组变流器失效分析及防护策略逐渐引起了研究人员的重视。文献[29]对海风环境下的温湿度、盐雾、H_2S 等气体对 IGBT 模块腐蚀的影响及作用机理进行了研究。目前防护问题主要从器件本身和变流器柜体 2 个层面来解决。对于器件本身，可通过优化结构材料(提高金属材料耐腐蚀性)和封装结构(提高 IGBT 模块气密性)这 2 种路线来提高 IGBT 在海风环境下的耐腐蚀能力。另一方面，在变流器柜体层面，可以通过设计高防护措施(如密封，防潮等)降低外部复杂环境对 IGBT 模块的影响。另外，还可以通过控制手段来改善变流系统的服役环境，文献[30]提出一种基于无功环流的主动热控制策略，用以调节冷点的温度，以此防止潮湿环境下的凝露现象。

金风科技联合湖南大学等单位，研发了海上超大容量风电机组多通道模块化变流拓扑及系统，提出了高湿、高盐、化学侵蚀等恶劣环境下的变流系统多重防腐和多层次绝缘结构[31]。

4）机械传动装置安全性提升设计

机械传动装置包含齿轮箱、主轴承、轮毂等。其中，齿轮箱与主轴承的设计对于提升大型风电机组能量转换系统运行安全性尤为关键。

(1)齿轮箱设计类型多样，根据结构和传动比可分为单级平行轴、多级行星和混合型等，单级平行轴齿轮箱结构简单，传动比通常为 10:1 至 20:1[32-33]。多级行星齿轮箱(2~3 级)能够实现更高的传动比(>50:1)。然而，多级高速齿轮箱的高速级轴承和齿轮在交变载荷与瞬态冲击下极易发生点蚀、断齿及润滑失效[34]。挪威科技大学研究人员通过引入一级或两级行星齿轮箱，将发电机转速提升数百转。在保留齿轮箱增速功能的同时，避开了故障率最高的高速齿轮级[35]。在大扭矩工况下，齿轮箱箱体与齿轴的弹性变形不可避免，这会导致齿面啮合错位。加贝斯大学研究人员引入多目标可靠性设计优化方法，将齿轮宏观参数(模数、齿宽)与微观修形量作为联合设计变量，在满足体积最小化的同时，确保齿轮接触疲劳强度满足 20 年以上的设计寿命要求[36]。

(2)风机主轴承是风力发电机机械传动装置的重要部件，其性能直接影响着风机的使用寿命。大连理工大学研究人员基于坐标向量运算，建立了 5 自由度双列圆锥滚子轴承的拟静力学分析模型，并利用多岛遗传算法针对轴承寿命进行优化设计[37]。针对主轴承润滑设计中参数匹配困难的问题，湖南大学研究人员利用已建立的弹流脂润滑随机模型指导反向优化设计，在设计源头实现轴承结构与润滑介质的最佳匹配，显著提升了主轴承在全生命周期内的抗磨损能力与可靠运行能力[13]。

2.2.2　叶片运行安全性提升设计技术

随着风电机组容量不断增大，风电机组叶片长度持续增长，冰冻、雷击、雨水侵蚀等复杂环境对叶片运行安全性的影响日益加剧。

1）叶片防冰与除冰设计技术

风电机组叶片覆冰会严重破坏叶片的气动特性[38]，最终导致发电功率大幅衰减甚至停机事故[39]。据统计，严重覆冰可导致风机年发电量损失高达 20%~50%[40]。因此，开发高效、高耐久的防/除冰技术，对于提升大型风电机组服役性能至关重要。现有的叶片防护策略主要包含 3 类，分别为主动、被动及协同防/除冰技术，如表 1 所示。

表 1 风电机组叶片防/除冰技术综合性能对比

Table 1 Comprehensive performance comparison of anti-icing and de-icing technologies for wind turbine blades

类别	核心机理	主要优点	主要挑战
主动防/除冰技术	外加能量加热或施加外力，主动破坏或融化冰层	1.技术成熟、可靠性高；2.不依赖环境条件，可快速除冰	1.能耗较高；2.机械方式易造成结构疲劳；3.可能形成回冻与二次结冰
被动防/除冰技术	利用表面材料特性减缓结冰或促脱冰,不依靠外部能量	1.能耗低，运行成本低；2.延缓结冰、减弱冰粘附力	1.耐久性不足；2.对已成型冰层效果有限
协同防/除冰技术	结合主动与被动手段，提升综合性能	1.可显著降低电热除冰能耗；2.可消减二次结冰	1.多层材料体系制备复杂；2.成本提高

哈尔滨工业大学研究人员提出利用废热提高气热法防/除冰系统的性能[41]。东北农业大学研究人员指出电热除冰的能耗随风速和冰层类型显著变化[42]。国防科技大学研究人员制备了纳米复合涂层，该涂层在高达 35 m/s 的液体冲击下仍保持不润湿状态，为解决涂层在高速旋转下的失效问题提供了新方案[43]。密西根大学研究人员在《Science》上发表论文指出，具有低剪切模量的材料能以极低的力实现大面积除冰[44]。西华大学研发的 E-PPCT 涂层结合了电热与光热涂层，相比单一电热模式，其节能效果显著[45]。

株洲时代新材料科技股份有限公司与湖南大学研究人员联合研发了一种叶片模块化气热抗冰方法及系统[46]，该模块化系统可用于已运行的风机改造。此外，还设计了一种气热/电加热复合抗冰风电叶片结构[47]，当电加热系统出现故障时，气加热系统能自动开启加热，从而提高系统的安全可靠运行能力。湖南大学团队研究了一种协同防/除冰技术，结合疏水被动防冰、光热主动防冰和相变延缓结冰，实现了结冰前中后期的全面防冰[48]。

2）叶片防雷击设计技术

直击雷是威胁风力发电机组安全可靠运行能力的主要自然灾害。叶片损坏约占雷击造成故障总数的 20%~28%，对经济效益影响显著[49]。叶片防雷击系统由接闪、引下与接地环节构成。

(1)接闪技术。接闪通过在叶片表面设置受控金属接闪器吸引雷电先导，并通过固定雷击点来保护叶片本体。湖南防灾科技有限公司用高纯度铜合金编织的金属网铺设于主次接闪器间，适合与叶片融冰装置结合使用[50]。株洲时代新材料科技股份有限公司研究人员通过优化金属网与引下线的连接结构，有效减小了电阻突变与雷击损伤风险[51]。

(2)引下技术。引下技术旨在将接闪器截获的雷电流安全高效地从叶片高处引至塔筒及地面，避免电流内部传导引发机械损伤或过电压。雷电流传导建模是引下设计的基础[52]。上海电力大学研究人员提出接线端子结构改进方案，显著提升了机组抗雷击能力[53]。当前研究表明，引下技术在追求低阻抗、高机械可靠性的同时，还需综合考虑材料耐腐蚀性、轻量化及与叶片结构的兼容性。

(3)接地技术。接地与等电位连接作为防雷系统最终环节，旨在避免反击过电压损坏精密设备。北京交通大学研究人员通过暂态仿真揭示雷击冲击下风机接地系统的电位分布规律[54]。清华大学学者指出，叶片与塔筒耦合效应会改变冲击电流散流路径[55]。接地技术正向系统化、频域特性适配、环境影响综合评估等方向发展。

3）叶片抗侵蚀设计技术

风力发电机叶片侵蚀主要由雨滴、冰雹等高速冲击引起，导致叶片气动性能下降，甚至引发结构损伤。近年来，相关研究主要集中在高性能防护材料开发与侵蚀过程建模等方面。

(1)材料体系与结构设计。为提升风机叶片涂层抗冲击与疲劳性能，当前研究从传统热固性树脂转向更具抗冲击与疲劳的热塑性及杂化材料。荷兰学者研发了共固化热塑性-热固性杂化系统[56]。爱尔兰学者通过粘弹性聚氨酯的高阻尼特性耗散冲击能量[57]。布里斯托大学研究人员揭示了粘弹性聚氨酯应变率相关力学行为[58]。已有研究表明，分子设计是抵御高速冲击的有效途径之一[59]。

在材料基体上，微观结构构筑可进一步主动调控力学响应。国家能源集团通过复合氟化改性环氧树脂(epoxy resin, EP)与固化剂，提升粘附力、抗冲击稳定性及耐磨性[60]；添加陶瓷氧化物纳米颗粒[61]可显著增强抗固体粒子侵蚀能力。纤维增强[62]与石墨烯纳米片[63-64]通过桥接、偏转裂纹及散射应力波屏蔽缺陷，能够大幅降低缺陷处应力集中程度。通过赋予涂层特定本征性能以主动耗散冲击能量，是另一种有效的防磨损策略[43]。

(2)失效机理与智能设计。风机叶片实际服役环境要求涂层体系具备抗多场协同退化能力，主要面临紫外线、风沙与湿热长期作用带来的关键挑战。

文献[65]综合多个因素，研究风沙对叶片的冲蚀特性；文献[66-67]的研究表明，水分会软化聚合物、降低其模量。然而，当前多数侵蚀测试标准未充分考虑长期环境老化因素，导致实验室加速测试与现场实际寿命存在偏差。

2.3　大型风电机组能量转换系统运行安全性提升控制技术

大型风电机组能量转换系统运行安全性提升控制技术通过对系统运行状态进行动态调整，使得机组在电网故障、极端风况和部件失效等情况下仍能够维持稳定运行，主要包括发电机系统安全控制技术和安全变桨控制技术。发电机系统安全控制技术通过故障穿越、容错控制等方式，提升机组在外部故障和内部失效情况下的稳定运行能力；安全变桨控制技术通过降载控制和保护类变桨控制策略，提升叶片在极端风况下的安全运行能力。

2.3.1　发电机系统安全控制技术

发电机系统安全控制技术主要包含 2 类关键方向：一是针对电网故障场景的故障穿越控制，确保机组在电网扰动下持续并网并提供支撑；二是面向机组自身部件失效的容错控制，提升故障状态下的安全可靠运行能力。

1）故障穿越控制技术。当电网出现故障时，发电机系统易因功率不平衡引发故障电流越限、功角暂态失稳等连锁故障。随着风电装机规模持续扩大，GB/T 19963.1—2021 等标准明确要求风电机组具备故障穿越能力。当前故障穿越控制策略围绕限流和稳暂态两个方面展开，主要形成 3 类核心技术路径。

虚拟阻抗控制通过在控制环路中引入虚拟电阻、电抗或阻容复合阻抗，重塑机组输出阻抗特性，可从根源上抑制故障电流幅值，是工程中最常用的基础限流方法。其核心机理是通过虚拟阻抗分担电压跌落带来的电压差，从而降低故障电流的暂态冲击与稳态幅值。西安交通大学研究人员提出分段式虚拟阻抗控制，在故障期间投入高值虚拟阻抗抑制暂态冲击电流，在恢复阶段启用时变虚拟恢复阻抗，既避免了恢复阶段的二次电流冲击，又明确了虚拟阻抗的定量匹配关系[68]。该类方法的技术关键在于阻抗参数的动态适配，需兼顾限流效果与暂态稳定性，避免因阻抗过大导致功角失稳。

功率指令优化控制通过动态调节有功、无功功率指令，可从根源上缓解机网功率不平衡问题，从而保障暂态功角稳定。其核心逻辑是根据故障工况自适应调整功率分配，优先满足暂态稳定约束[69]。针对深度电压跌落情况，湖南大学研究人员提出有功功率指令的分段调整策略，在跌落初期将有功指令降至安全范围，在严重跌落时将有功指令暂置为零，优先保障无功支撑与功角稳定，待电网电压恢复再逐步回升有功指令，从而避免功率突变引发的二次扰动[70]。

混合协调控制深度融合虚拟阻抗与功率指令调节的技术优势，通过动态协同实现多场景精准适配，解决了单一策略适配性不足的问题，其核心在于根据故障发展阶段动态分配 2 类控制的权重。上海交通大学研究人员基于暂态电压支撑机理，优化弱电网场景下的协同逻辑，通过虚拟阻抗改善阻抗匹配特性，同时通过无功指令前馈补偿虚拟阻抗带来的电压跌落，使机组在弱网故障下仍能保持功角稳定[71]。湖南大学研究人员提出了一种基于两阶段自适应虚拟阻抗的限流方法，以提高发电机系统对电网的支撑能力。在故障暂态阶段，利用故障压降快速计算出较大的虚拟阻抗值，以抑制故障电流的峰值幅值；在故障稳定阶段，利用故障电流的幅值进一步优化虚拟阻抗值，以提高容量利用率[72]。

2）容错控制技术。风电机组发电机长期运行于复杂工况下，其电气系统易发生故障。容错控制通过故障状态下的控制策略重构，确保发电机在部件局部失效时仍能维持稳定运行。目前，发电机机侧的容错控制研究主要围绕绕组故障与传感器故障两大方向展开。

针对绕组故障的控制需要重新分配电流以维持电机平稳运行，并尽可能降低功率损失。基于转矩/磁动势不变原则，通过优化分配剩余健康相的电流指令实现容错运行。中山大学研究人员采用从离线图谱或在线估计中获得的参数构建最大转矩电流比模型，并推导出最优电流以维持高转矩[73]。南京航空航天大学研究人员则利用相量法分析转矩脉动，提出一种最优电流直接控制策略，旨在实现不同故障程度下的强容错功率输出，同时最小化故障态的转矩脉动[74]。

故障后电机由于故障相退出运行，电机模型阶数下降，通过构建缺相后的解耦变换矩阵，可建立故障状态下的降维电机模型，进而实现电机故障状态下的控制。哈尔滨工程大学研究人员引入虚拟健康模型，保持控制结构不变，通过给定最小铜耗的

正弦电流参考并结合电压补偿与改进的谐振控制器，以抑制转矩和电流波动[75]。南京理工大学研究人员基于矢量空间分解，并根据不同的初始角度和幅度构建负序分量来进行故障建模[76]。此类方法控制精度高，能有效抑制故障后的谐波畸变，但对模型参数准确性要求严苛，解耦矩阵推导复杂，计算开销较大。

在传感器故障容错控制方面，核心是利用软件算法估计值替代故障传感器的反馈信号。东南大学研究人员提出一种改进的自适应滤波器来抑制故障引起的信号畸变，从而获得鲁棒的转子位置估计，该方法对突发故障具有很强的鲁棒性[77]。

容错控制技术方面，湖南大学研究人员提出一种基于空间矢量脉宽调制的容错直接转矩控制策略，使故障前后定子电流和定子磁链保持相同的圆形轨迹，同时引入 z 轴闭环控制器来抑制由死区时间和反电动势畸变等因素引起的电流谐波，进而实现电机在开路故障下的容错运行[78]。

2.3.2 安全变桨控制技术

随着叶片长度的持续突破，风切变、塔影效应和湍流导致的周期载荷显著增强，独立变桨控制(independent pitch control, IPC)逐渐成为降载控制研究的核心方向。早期 IPC 多基于 Coleman/Clarke 变换，以谐波补偿实现对周期载荷的削减，但难以处理大型机组中的强耦合非线性。为此，研究人员提出了多输入多输出(multiple-input multiple-output, MIMO)与鲁棒控制方法，如 H∞、滑模及增益调度 IPC，可显著降低叶根弯矩和塔顶振动[79]。与此同时，智能控制方法也逐渐融入 IPC 系统。湖南工业大学研究人员利用神经网络实现 IPC 参数自适应整定，使控制器在不同风况下均能保持最优可靠运行能力[80]；西班牙公立大学研究人员提出 Lookup Table+神经网络的混合控制策略，提高了载荷预测与控制的鲁棒性[81]。

保护类变桨控制主要针对阵风、飓线、台风等极端风况。此时，传统查表式削峰控制已难以满足快速非定常风的安全裕度需求，因此出现了基于模型预测控制(model predictive control, MPC)的削峰方法，通过在线优化实现极限载荷降低与平稳转速调节。德国慕尼黑工业大学研究人员基于全风速范围的保护控制策略，显著提升了极端风况下的停机安全运行能力[82]。极端风况下的停机过程中常会发生剧烈结构冲击，为此河海大学研究人员基于 IPC 的停机载荷分析方法，有效降低了快速顺桨造成的塔架弯矩峰值[83]。

3 大型风电机组能量转换系统运行保障能力提升技术

大型风电机组能量转换系统的运行保障是一个系统工程，其核心目标是保障系统的稳定运行，最大化系统的发电时间，包括状态监测与故障诊断、维护与检修、运行管理等一系列措施与手段。其中，状态监测与故障诊断是最为关键的一环，因此，本章主要介绍大型风电机组能量转换系统状态监测与故障诊断技术。

3.1 大型风电机组能量转换系统关键部件状态监测与故障诊断技术

大型风电机组能量转换系统涉及多种能量转换与耦合，其中任一环节发生异常，故障都会沿机械路径和电磁路径迅速传播，导致机组性能下降乃至停机事故。因此，在风电机组服役过程中，围绕发电机系统、叶片等进行状态监测与故障诊断，是提升大型风电机组能量转换系统运行保障能力的基础。

3.1.1 发电机系统状态监测与故障诊断技术

发电机长期运行于电磁负荷与机械负荷的双重作用下，且受高次谐波、高温及电网冲击的影响，其故障导致的停机时间在风电机组各部件中占比居高不下。

发电机的失效模式具有显著的多物理场耦合特征，主要故障类型可归纳为以下 3 类：电气故障(包括定子绕组匝间短路、相间短路及绝缘老化等)、热故障(包括绕组局部过热及冷却系统失效引起的温升异常等)和机械故障(包括轴承疲劳磨损、转子不平衡及不对中等)[84]。

为了精准捕捉发电机故障早期的微弱征兆，基于专用传感器的监测技术在发电机系统中得到了广泛应用。文献[85]利用温度传感器建立一种基于等效热网络与 Stacking 集成算法融合驱动的海上风机早期故障预警方法。文献[86]提出了一种结合压缩感知重构与经验模态分解(empirical mode decomposition, EMD)的状态检测方法，并辅以白噪声增强技术，有效提升了监测系统在数据压缩条件下对轴承磨损与转子不平衡等机械故障的敏感度。湖南大学研究人员通过引入时频参数与分辨率自适应算法(time-frequency parameter and resolution adaptive algorithm, TF-PRAA)，实现了电机变工况下的多故

障精准诊断[87]。

变流器的失效模式主要集中在功率半导体器件和直流环节电容等核心部件上，其主要故障形式包括功率开关管的开路故障和短路故障等。为了实现对变流器故障的快速识别与精确定位，国内外学者开展了大量研究，形成了基于电流、电压信号的多种故障诊断方法。基于电流信号的诊断方法通过分析三相电流在幅值、相位及轨迹上的畸变特性，构造归一化电流平均绝对值、Park 矢量相位角、电流相似性指标等特征[88]，实现对机侧与网侧变流器单管及多管开路故障的检测与定位，在变速运行条件下表现出较好的适应性。部分研究进一步引入小波变换、Hilbert 变换以及支持向量机、神经网络等智能算法[89]，有效提升了复杂工况和噪声干扰条件下的诊断精度。基于电压信号的故障诊断方法通过分析相电压、线电压及桥臂中点电压在故障前后的偏差特征[90]实现快速诊断，在实时性方面具有明显优势。

作为机组能量转换与传递的枢纽，机械传动链长期承受阵风冲击及电网扰动等复杂工况带来的影响，是故障率最高且停机维护时间最长的子系统。据统计，大型风电场的运维成本约占总收入的15%~35%，其中齿轮箱与轴承等关键部件的故障是导致非计划停机和运维成本高的主要原因[91]。

齿轮箱内部包含多级行星轮系与平行轴齿轮，结构复杂且故障频发，在风电机组各部件中，齿轮箱故障导致的停机时间占比位居前列。齿轮箱失效主要源于风载荷的随机波动与交变应力。常见的故障形式包括齿面磨损、点蚀、断齿等。研究表明，在非平稳风况下，齿轮箱承受的动态载荷会加速齿根裂纹的萌生与扩展；此外润滑系统失效引起的油温过高或油膜破裂，会加剧接触面的摩擦磨损，进而诱发灾难性故障[5]。

齿轮箱作为典型的由非平稳信号主导的复杂机械系统，其故障特征往往被淹没在变工况产生的非平稳调制信号与强背景噪声中。现有诊断技术根据数据分辨率的不同，可分为基于数据采集与监控(supervisory control and data acquisition, SCADA)系统数据的状态评估和基于振动信号的精密诊断。

SCADA 系统记录了机组的功率、转速、温度等数据。针对其采样频率相对低但包含丰富工况信息的特点，现有研究主要致力于构建正常行为模型(normal behavior model, NBM)。重庆大学研究人员等提出了一种结合卷积神经网络(convolutional neural network, CNN)和门控循环单元(gated recurrent unit, GRU)的状态监测方法[92]。

振动分析是诊断齿轮箱机械损伤的主流方法。由于变转速工况下信号的非平稳性，传统的 Fourier 变换难以奏效，因此时频分析方法成为研究热点。经验模态分解虽能自适应地分解信号，但存在模态混叠和端点效应等固有缺陷。相比之下，变分模态分解通过非递归方式将信号分解为固有模态函数，在提取齿轮箱冲击特征方面表现出更强的抗噪性与鲁棒性[93]。此外，基于小波变换将一维振动数据转化为时频图像，并结合深度学习模型进行特征自动提取，也成为解决复杂故障模式识别难题的有效手段[94]。

轴承支撑着风轮、主轴及发电机的旋转，承受着巨大的径向力、轴向推力及倾覆力矩。特别是主轴轴承，其运行转速低(通常<20 r/min)、载荷大，一旦损坏，更换难度极大且成本高昂。轴承的主要失效模式包括滚动体及滚道的疲劳剥落、裂纹、磨损、保持架断裂以及由轴电流引起的电蚀[95]。由于主轴转速极低，故障产生的冲击能量微弱，且极易被齿轮箱及发电机的高频振动噪声所掩盖，因此特征信噪比低。声发射技术因其对材料内部微观裂纹的高敏感性，被证明在早期故障检测方面优于振动分析。为解决复杂工况下特征提取困难的问题，深度学习算法在轴承故障诊断中得到了广泛应用。此外，针对变工况问题，基于迁移学习的方法也被用于解决训练数据与测试数据分布不一致的难题[96]。

3.1.2　叶片状态监测与故障诊断技术

叶片作为捕获风能的核心部件，其造价约占整机成本的 20%[5]。由于长期运行在变载荷、高腐蚀及极端气候等恶劣环境中，大型风电机组叶片极易发生各类损伤与故障。

1）风电机组叶片故障类型

风电机组叶片的失效是一个多物理场耦合的复杂过程，根据损伤发生的部位及表现形式，主要可分为结构损伤与表面损伤两大类。

结构损伤涉及叶片内部材料及整体结构的完整性破坏，具有隐蔽性强、危害大的特点，主要包括质量不平衡、内部裂纹扩展及分层脱粘；表面损伤主要由环境侵蚀和外物撞击引起，虽初期对结构强度影响较小，但会显著恶化叶片的气动特性，常见的表面故障包括前缘腐蚀、裂纹、砂眼、划痕等。

现有诊断技术根据数据获取方式的不同，可分

为基于物理信号的接触式诊断和基于成像的非接触式诊断[97]。前者侧重于捕捉结构动力学响应与电气特征，后者侧重于捕捉表面形态与热力学异常。

2）接触式叶片故障诊断技术

接触式诊断技术主要通过安装在叶片或传动链上的传感器，采集振动、声纹、应变、电气等信号，结合信号处理与人工智能技术挖掘故障特征。

(1)振动与声纹监测。振动分析是目前工业界应用最成熟的技术之一，通过加速度传感器获取叶片的振动响应，并利用模态分析法识别频率、阻尼等参数变化来判断损伤。然而，环境噪声和运行工况的非线性往往会淹没早期的微弱故障信号。相比之下，声发射技术对微小的结构变化更为敏感。NSIRC (National Structural Integrity Research Centre)的研究成果表明，声发射适用于检测裂纹萌生和扩展产生的高频弹性波，能够有效区分纤维断裂与基体开裂[98]。尽管声发射能实现早期预警，但在大型叶片上布置高密度的传感器网络成本高昂，且信号衰减是其工程应用面临的主要挑战。

(2)应变与光纤传感。光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)传感器因其抗干扰、体积小、耐腐蚀等优势，成为监测叶片应变分布和动态特性的研究热点。国防科技大学研究团队指出，通过监测波长漂移，反演应变场变化，可有效识别叶片受载状态及内部损伤[99]。然而，光纤传感器易因疲劳或蠕变而失效，其在叶片全生命周期内的可靠性仍需进一步验证。

(3)电气信号特征分析。针对叶片质量不平衡等导致的转矩波动故障，利用发电机定转子电流信号进行故障诊断是一种经济型方案。华北电力大学团队提出基于 *dq* 坐标变换的诊断方法，通过分析发电机定、转子电流中的特定频率分量，可有效识别叶片质量不平衡故障[100]。该方法无须加装额外传感器，利用现有的电气监测系统即可实现。

(4)数据驱动的智能诊断。随着人工智能技术的发展，基于 SCADA 数据的故障预测成为主流趋势。文献[101]针对传统机器学习算法在处理高维、时序数据时的局限性，提出了改进的 LightGBM 算法，通过引入 GRU 提取历史时间序列特征，显著提升了故障预测的准确率。这类方法成本低廉，但高度依赖于数据质量。

3）非接触式叶片故障诊断技术

为解决传感器安装维护困难及单点监测覆盖面不足的问题，基于计算机视觉和红外热成像的非接触式诊断技术发展迅猛，正逐渐替代传统的人工巡检。

红外热成像技术利用材料热特性的差异，通过观测叶片表面的温度分布异常来识别内部缺陷(如分层、积水)。红外热成像分为主动式和被动式：主动式需外部热激励，受现场加热设备的功率限制；被动式依赖于环境温差，受天气影响较大[102]。

随着无人机技术的成熟，基于可见光图像的表面故障诊断成为研究热点。该方法通过无人机搭载高清相机，对叶片进行全方位图像采集，随后利用图像处理和深度学习算法进行故障识别。香港城市大学学者提出了一种基于无人机图像的自动裂纹检测框架，利用 Haar 特征训练级联分类器，实现了高效的裂纹识别[103]。相比于深度学习需要海量标注样本，基于图像特征提取的方法在小样本条件下即表现出了更好的灵活性和可解释性。然而，该技术对图像质量要求较高，光照变化、运动模糊等环境因素仍是制约其推广应用的关键瓶颈。

3.2 大型风电机组能量转换系统健康状态监测技术

风电机组能量转换系统各子系统间物理场耦合效应强，故障特征常在机械、电磁及热力学路径上交叉传播与演化。针对叶片，监测技术已从传统的振动分析拓展至声发射与非接触式机器视觉，实现了对结构损伤及表面气动故障的全面覆盖；对于机械传动装置，齿轮箱与轴承的诊断侧重于利用高频振动、声发射及深度学习算法，突破了低速重载与非平稳工况下的微弱特征提取瓶颈；发电机与变流器则通过电气信号特征分析与多物理场融合监测，有效解决了定子短路、转子偏心、磁热失稳、功率开关管开路等复合故障的精准溯源。

然而，仅依赖单一部件的分散监测难以全面评估整机健康状态。为应对系统级耦合故障，湖南大学联合兴蓝风电研究团队构建了风电机组数字孪生系统，见图 2。该系统通过在数字空间实时重构发电机系统与叶片等的多物理场运行状态，实现了数据与机理的深度融合及虚拟-实体的双向映射，从而为整机层面的协同诊断与预测性维护提供核心支撑。

整机健康状态评估对于保障风电机组安全高效运行也十分关键。针对能量转换系统部件多、运行条件随机性强的特点，目前对风电机组健康度的评估研究主要有模糊评价法、灰色关联法[104-105]、人工智能法[106]等。文献[107]提出一种融合多维特



图 2　风电机组数字孪生系统

Fig.2　Digital twin system for wind turbines

征分析、随机组合赋权的模糊综合评价方法，构建分层健康状态评估模型。文献[108]提出了一种基于模糊综合评价法的评估体系，结合熵权法计算各指标权重，评估系统的健康状况并预测未来趋势。文献[109]结合多元线性回归与 BP 神经网络，提出了基于模糊综合评价的风电机组健康状态评价体系。文献[110]融合去噪与稀疏自编码器特性，改进传统栈式自编码器模型，通过重构误差分布后的差异分析与多指标融合，实现对发电机运行状态的健康度评估。模糊评价方法能够较好地反映风电机组运行参数与健康状态之间的随机性，但在指标体系构建、权重分配以及健康等级划分等环节中存在较强的主观性，增加了评估结果的不确定性[111]。同时，由于风电机组所处环境复杂多变，指标选取过程容易产生偏差，因此会影响评估的准确性与可靠性。神经网络方法虽然广泛用于基于运行参数的健康状态评估，但其在参数阈值设置上依赖于历史数据，且神经网络模型缺乏可解释性，因此评价结果的科学性仍需进一步提升。

4　大型风电机组能量转换系统运行效率提升技术

大型风电机组的能量转换系统是集空气动力捕获、机械传递与电磁转换于一体的复杂耦合系统，其运行效率提升不仅依赖于单一关键部件的性能优化，更取决于系统级的协同设计与控制。本章分别从运行损耗分析、运行效率提升设计及控制技术 3 个方面展开论述。

4.1　大型风电机组能量转换系统运行损耗分析方法

风电机组的能量转换过程伴随着多物理场的能量耗散，主要表现为机械摩擦损耗、电磁损耗等。深入分析各类损耗的产生机理与影响因素，是运行效率提升设计与控制的前提。根据能量转换环节的不同，运行损耗主要可分为以下 3 类：

1）发电机损耗。发电机中的损耗主要包括铜损、铁损、机械损耗和杂散损耗 4 种类型，由于铁损的非线性、耦合性更强，因此其分析难度比其他类型损耗要大，也是目前研究的重点。目前分析方法主要有传统公式计算法、有限元法、谐波分析法、基于解析模型的子域法[112]、计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)法[113]等。

2）变流器损耗。变流器损耗主要包含电力电子器件的开关损耗、导通损耗及二极管反向恢复损耗，分析方法主要包括基于数据手册的解析计算法[114]、基于仿真模型的动态波形分析法[115]和基于实验测量的校准法等。随着 PLECS、ANSYS、MATLAB 等软件的进步，可以支持发电机、变流器的电-热协同仿真，进一步提升了损耗分析的精度。

3）机械传动损耗。齿轮箱作为机械能量传递的中枢，其损耗主要源于齿轮啮合摩擦、轴承摩擦及搅油损失等。齿轮箱在工作时内部温度波动较大，需依靠润滑冷却与加热系统维持最佳工作温度区间，这一过程同样伴随着电能损耗。针对这一问题，国内外学者开展了大量研究。波尔图大学研究团队探讨了润滑油特性对传动效率的影响，指出通过优化润滑油选型可降低齿轮箱的功率损耗[116]。葡萄牙学者则从温度场角度切入，建立了海上风电机组齿轮箱的能效评估模型，揭示了温度变量对传动效率的非线性影响机制[117]。

4.2　大型风电机组能量转换系统运行效率提升设计技术

叶片作为能量捕获的源头，其气动外形设计直

接决定了整机的风能利用系数上限；机械传动装置与发电机的集成设计能有效减少传递过程中的机械损耗并降低故障率，发电机系统的优化设计则侧重于降低电磁转换环节的铜损和铁损，提升电能输出质量。通过对发电机系统的材料、参数进行优化，并结合集成设计架构，能够显著提升大型发电机系统的运行效率；通过对叶片的气动外形等进行优化设计来提升叶片的风能捕获效率，是叶片运行效率提升的关键技术。

4.2.1 发电机系统运行效率提升设计技术

为提升大型发电机的运行效率，设计重点正从单一的结构轻量化向能效-成本综合最优转变。随着设计自由度的增加，如何在保证转矩密度的同时最小化电磁损耗成为关键，传统的试凑法难以平衡效率、功率因数与成本之间的矛盾。因此，基于智能算法的多目标协同优化成为研究热点。文献[118]采用高维多目标优化算法对 20 MW 级发电机的比功率、单位成本功率、效率、功率因数进行优化。麻省理工学院研究人员建立了一种基于物理信息的神经网络，可在毫秒级时间尺度下预测发电机在不同工况下的铁耗分布[119]。另一方面，传统“先设计本体，后匹配控制”的串行模式正在被本体与控制策略协同优化所取代。湖南大学研究人员提出了一种基于集成矢量控制策略的新型解析设计模型，将变流器电流极限与直流侧电压极限作为边界条件嵌入遗传算法，对 1.5~10 MW 范围内 5 个功率等级的机组进行了以材料成本最低为目标的系列化寻优[120]。此外，湖南大学研究团队提出了一种直驱永磁风力发电机多工况全局效率最优设计方法，在变速变频、定子电压随负载和转速变化而变化、运行特性受变流器和控制策略影响等情况下，实现了直驱永磁风力发电机多工况多目标优化设计[121]。

在变流器设计方面，相关研究逐步从器件与拓扑转向并联系统环流抑制、调制策略等的协同优化。并联变流器模块间参数不一致或电流分配偏差会诱发环流，环流不仅会带来额外铜耗与器件损耗，还会降低功率器件寿命，因此环流抑制是变流器效率提升的关键环节[122]。围绕并联环流机理与抑制方法，浙江大学学者基于载波移相并联系统建立环流模型，揭示了环流具有低频与高频分量，并通过在空间矢量脉宽调制(space vector pulse width modulation, SVPWM)中引入有效零矢量，采用正弦 PWM 与 SVPWM 混合调制等方式抑制高频零序环流，从而减少并联系统附加电流与损耗[123]。针对低频环流，电子科技大学研究团队提出“陷波器提取三倍频零序环流+PR 控制器谐振跟踪”的抑制框架，实现了三倍频零序环流幅值由 215 A 降至 25 A，为降低低频环流造成的附加损耗提供了有效解决途径[124]。此外，长沙理工大学学者采用超级电容器储能，通过级联 Buck-Boost 电路在故障期间吸收直流侧不平衡能量，稳定直流母线电压，并与机侧加速减载、网侧无功支撑协同优化，在保障器件安全的同时，改善了故障期间的能量利用率与热负荷分布[125]。

在齿轮箱与发电机的集成设计方面，早期的直驱和半直驱永磁风力发电机系统中，主轴承、齿轮箱、联轴器与发电机作为独立的子系统，按顺序安装在主机架上。这种串联式布局导致机舱长度过长，且联轴器是传动链中的薄弱环节，极易因安装不对中而产生高频振动，进而诱发电机轴承电蚀与齿轮箱高速级密封失效[126]。

针对分立式设计存在的轴系刚度不足与机舱长度过长等弊端，半集成技术应运而生。半集成技术取消了联轴器，发电机定子机壳通过法兰直接刚性连接在齿轮箱箱体上，发电机转子由齿轮箱输出轴直接驱动。ABB 公司通过半集成设计将传动链长度缩短了约 30%，不仅消除了联轴器的故障点，还通过刚性连接显著提升了轴系的抗扭刚度[127]。全集成设计极大地提高了集成度，该设计技术将行星齿轮箱“嵌入”发电机内部，齿轮箱与发电机共用一套机械结构[128]，不仅降低了轴向尺寸，还减轻了整机重量，但这也对齿轮箱的制造精度与多物理场解耦设计提出了极高要求。

针对高度集成系统设计中面临的多变量耦合难题，湖南大学研究人员采用基于高斯过程的传动链智能反演优化方法，实现了在复杂控制策略下系统效率与转矩波动的高精度协同优化[129]。

4.2.2 叶片运行效率提升设计技术

叶片的气动性能是决定风电机组发电效率的根本因素。为了突破传统设计的效率瓶颈，基于叶素动量理论的 Wilson 设计方法被广泛应用于现代大型叶片的气动外形设计中。Wilson 方法在考虑叶尖损失和轮毂损失的基础上，以风能利用系数最大化为目标，建立叶片弦长与扭角的最佳分布模型[130]。该方法通过迭代求解诱导因子，能够确立设计风速下叶片各截面的最优气动参数，使叶片在额定风速下获得最佳的气动效率。

在叶片截面翼型的设计与优化方面，传统的美国国家航空咨询委员会(National Advisory Committee for Aeronautics, NACA)系列翼型已难以满足大型风电机组对大厚度、高升阻比及低粗糙度敏感性的需求。目前，基于参数化建模与智能算法的“正向设计法”成为提升翼型效率的主流路径。美国国家航空航天局(National Aeronautics and Space Administration, NASA)提出的Hicks-Henne型函数扰动法[131]，通过在基础翼型上叠加形状函数来描述几何外形，能够以较少的设计变量实现对翼型前缘半径、最大厚度位置等关键几何特征的精确控制与优化。

为了在多维设计空间中寻找气动性能的最优解，自适应遗传算法(adaptive genetic algorithm, AGA)等智能优化策略被引入叶片设计流程。重庆大学学者研究发现，通过模拟生物种群的遗传与演化过程，结合自适应控制搜索策略，可在全局范围内搜索出升阻比更高、失速性能更平缓的翼型方案[132]。在气动性能评估环节，麻省理工学院Drela Mark教授开发的XFOIL程序基于面元法与边界层方程的耦合求解，能够快速准确地预测低雷诺数下翼型的升阻力特性，极大地缩短了优化设计的迭代周期[133]；而对于复杂的流动分离与大攻角工况，葡萄牙学者指出，结合CFD方法求解Navier-Stokes方程，可以进一步验证优化结果的可靠性，确保叶片在全工况范围内保持高效运行[134]。此外，部分研究还尝试引入变分法求解最小阻力曲线，如基于最速降线理论推导新型翼型轮廓，从物理机理层面进一步降低叶片背风面的气动阻力，进而挖掘叶片运行效率提升的潜力。

4.3　大型风电机组能量转换系统运行效率提升控制技术

通过先进控制技术提升大型风电机组能量转换系统的整体高效发电能力，对于机组服役性能提升至关重要。发电机系统高效控制技术通过调整系统的运行状态来降低系统运行损耗；高效变桨控制技术则基于现代智能控制技术提升系统的运行稳定性。

4.3.1　发电机系统高效控制技术

发电机系统效率优化控制通过对电流指令的精确调控，可在不同工况下实现电机铜损和铁损的最优分配，是提升发电机系统高效发电能力与经济性的关键技术。目前，相关研究主要聚焦于降低损耗的效率优化控制技术和全局效率优化控制两个方面。

1）降低损耗的效率优化控制技术。最大转矩电流比控制成为内置式永磁同步电机效率控制的研究热点，通过优化电流相位角，使得在给定输出转矩下所需定子电流幅值最小，从而有效降低定子铜耗和驱动器导通损耗。但传统的最大转矩电流比(maximum torque per ampere, MTPA)控制方法在考虑电机参数因磁饱和而产生的变化方面能力有限，且收敛算法相对简单，导致在重载时易出现控制误差，在轻载时动态性能不佳。东南大学研究人员结合参数识别算法，在运行条件变化时将电感变化纳入MTPA控制，同时通过梯度下降算法引入自适应增益以优化算法收敛过程，在较宽的负载范围内提高了MTPA工作点的精度和动态性能[135]。哈尔滨工业大学研究人员利用三频陷波滤波器级联低通滤波器，提高了最大转矩电流比控制观测回路的动态性能和谐波抑制能力[136]。

单位功率因数控制方法原理简单、易于实现，能有效减少能量传输过程中的无功损耗。文献[137]表明单位功率因数控制产生相同电磁转矩所需的定子电流幅值较小，具有降低电机铜耗、提升效率的优势；同时，变流器的容量得到了充分的利用，可以减小变流器的功率等级，但该方法能够输出的最大转矩较小。对于凸极永磁同步电机，该方法无法利用磁阻转矩，导致在相同电流下输出转矩能力受限，效率提升幅度有限，通常被视为一种基础的或次优的效率控制策略。

2）全局效率最优控制技术。该类技术从全局角度进行效率优化，主要有基于损耗模型的解析法和不依赖于数学模型的在线搜索法。基于损耗模型的解析法核心是建立包含定子铜损、铁芯损耗等主要损耗分项的精确数学模型，求解总损耗最小化条件下的最优电流矢量。上海大学研究人员基于永磁同步电机损耗模型，通过解析法求解最优电流参考值，降低电机的铜耗与铁耗，提高了电机的运行效率[138]；安徽大学研究人员则基于内置式电机损耗模型获得了考虑铁损的电流预测模型，同时通过构建最小损耗条件下的电流约束实现电机的最小损耗控制[139]；韩国浦项科技大学研究人员利用曲线拟合简化复杂模型以降低计算负担[140]。该类方法理论上能获得全局最优效率点，但其性能高度依赖于模型参数的准确性，且高阶非线性模型的求解过程复杂，对控制器的计算能力要求较高。

在线搜索的效率优化控制方法不依赖于精确的数学模型，而是通过在线迭代搜索最佳电流矢量

或磁通指令，并实时观测系统输入功率或电流的变化趋势，逐步寻优至使系统总损耗最小的稳态工作点。德黑兰沙里夫理工大学研究人员将定子电流幅值作为目标函数，利用其对磁通变化更敏感、统计特性更优的特点，设计了一种自适应算法来确定磁通搜索步长[141]。该方法对电机参数变化和模型误差具有极强的鲁棒性，其主要缺点在于搜索过程收敛速度较慢，且频繁的扰动寻优在动态工况下易导致系统输出振荡，因此通常适用于稳态或缓变工况。

湖南大学的研究人员创建了面向复杂环境的大容量风电机组变流系统优化控制技术，发明了一种低载波比下电流谐波失真最小化的脉宽调制方法。该方法考虑了电机的凸极比、漏感和负载角，通过调节各相位开关角可以有效地减小定子电流的总谐波畸变，从而提高电机系统效率[142]。

4.3.2 高效变桨控制技术

为了使风电机组能够高效捕获风能，需要高效变桨技术的支撑，其核心是通过变桨控制(pitch control，PC)保持发电机转速与输出功率稳定。经典商用风机普遍采用基于比例积分(proportional integral，PI)的统一变桨控制器，其结构简单、工程应用成熟，是现代风电控制体系的基础。然而，随着5~10 MW及以上大型机组的柔性增强，传统PI控制难以兼顾塔架振动抑制与转速稳定性，从而推动了线性二次调节(linear quadratic regulation，LQR)与线性二次高斯(linear quadratic Gaussian，LQG)等现代最优控制方法在变桨系统中的应用[143]。上述方法通过引入状态空间建模与反馈控制，提升了对风扰的鲁棒性，使发电机输出功率平稳性显著增强。

湖南大学研究人员针对风资源时空分布波动下大型风电机组快速精准变桨难题，设计了基于模糊自适应比例-积分-微分(proportional-integral-differential，PID)控制器的协同变桨控制算法，提升了协同变桨控制器对环境参数变化的适应性和控制的准确性[144-145]。

5 大型风电机组能量转换系统服役性能提升技术发展趋势

随着材料革新、大数据与人工智能等技术的高速发展，作为风电降本增效的核心技术，大型机组能量转换系统服役性能提升技术也在不断向着安全、高效的方向进一步发展。

5.1 大型风电机组能量转换系统运行安全性提升技术发展趋势

5.1.1 发电机系统运行安全性提升设计技术发展趋势

1）融合人工智能、大数据与数字孪生的生成式智能协同设计技术。结合大数据和人工智能的智能化设计技术，重点考虑易损的薄弱部件，在全工况范围内寻找发电机功率密度、零部件寿命和成本等参数的最优平衡方案。大型风机发电系统高保真数字孪生技术，能够实现全工况条件下的系统级动态仿真，助力系统精确设计，推进发电机系统安全可靠运行能力提升设计技术发展。

2）高可靠性能量转换系统的一体化协同设计技术。将主轴、齿轮箱、发电机等组件集成到一个单元，提高风力发电机的可靠性、降低损耗、减小机组的体积与重量，在主轴支撑与行星轮系中结合滑动轴承技术，有效解决超大型风机轴承的大尺寸制造难题与失效风险。此外，基于新质材料的先进表面涂层技术，能够显著降低结构的摩擦磨损，为大型风机机械传动装置的轻量化和高可靠性发展提供支撑。

3）开展基于“主动支撑电网”的电磁、液力柔性前端调速技术研究。在发电机输入端通过电磁或液力装置实现柔性转速调节，该技术不仅能从源头缓解阵风引起的扭矩冲击，优化传动链的动力学性能，并能在一定程度上降低对后端全功率变流器的调节压力，为实现机组的高可靠性、更优电网友好性能提供了新型解决方案。

4）基于高效能磁场耦合传动的无接触式磁场调制齿轮传动技术。深入研究磁场调制式磁齿轮拓扑结构，该传动结构从原理上避免了机械齿轮的磨损、润滑及疲劳失效等问题，且具备自动过载保护功能，大幅减少传递到发电机端的振动和噪声，为提升传动链可靠性提供了新路径。

5）集成式主动轴电流防护技术。通过一体化电磁兼容设计和主动调制算法—低阻抗接地装置—新型绝缘器件的多层级协同抑制，实现轴电流从“源头抑制”到“路径安全流出”的全链条抑制处理，从多层面解决风电机组轴电流腐蚀问题。

6）针对高电压绝缘技术展开深入探索。研究以纳米复合电介质和高导热增强聚合物为代表的下一代绝缘材料，并针对关键部件开展梯度绝缘优化设计，通过新型材料与优化设计的融合，进一步提高绝缘系统的可靠性。

7）叶片的安全可靠设计技术。在极端气候环境下的叶片主被动协同深度防护除冰技术。介质阻挡放电(dielectric barrier discharge，DBD)等离子体技术不仅能产生热效应，还能通过诱导离子风改变边界层流场以防止水滴撞击，是下一代全电除冰的重要方向；采用新材料与柔性结构的协作应用，构建智能可靠的叶片防雷击系统。聚焦于优化接闪装置布局与新型防护方案的探索，深入分析雷电流在风机结构内的传导机理，优化引下系统的材料、连接工艺与结构兼容性，并考虑多种环境因素的接地系统性能综合优化；聚焦跨尺度侵蚀过程分析与新材料的智能化防护研究。研究多种环境因素协同作用下的材料退化机理，利用数字孪生、数据驱动等技术构建从微观损伤到宏观性能衰退的模型，并开展新型聚合物基体纳米材料的研发，融合实时监测与仿真的数字孪生技术实现涂层寿命的预测性管理，以实现长效、自适应的高性能防护。

5.1.2　大型风电机组能量转换系统运行安全性提升控制技术发展趋势

1）由跟网型被动响应走向构网型主动支撑，从定性分析转向稳定裕度的精确量化。弱电网与大规模并网下，机组需在限流条件下提供等效惯量、阻尼与短路电流支撑，并抑制宽频振荡。未来重点是通过虚拟同步、虚拟阻抗与电流限幅的协同整定，结合阻抗建模与场站级多机协调，兼顾故障穿越电压支撑与功角稳定，提升对并网点阻抗突变与直流外送工况的适应性，并通过阻尼注入抑制谐振，形成可验证的整定流程。

2）机组自身安全将提升为“预测—隔离/降额—自愈”的韧性控制链。面向功率器件热冲击、绝缘局放、轴电流等多场耦合失效问题，将深入研究健康状态驱动的动态电流上限、过载时间与调制策略，并实现保护定值与限流阈值的自适应整定；同时，利用模块化与冗余拓扑完成故障快速定位与控制重构，引入冗余传感与在线自检，配合变桨、制动与软停机策略，以降低连锁停机概率。

5.2　大型风电机组能量转换系统状态监测与故障诊断技术发展趋势

5.2.1　发电机系统状态监测与故障诊断技术发展趋势

1）基于新型嵌入式微纳米传感技术的全域深度感知监测技术，实现多物理场跨尺度融合智能监测。通过微纳米监测技术实现对电磁、温度、应力应变等多物理场参数在时间上和空间上的融合智能监测，为故障诊断提供特征准确的数据基础。基于数字孪生技术的物理机理与数据驱动深度融合，构建物理-数据混合驱动模型。解决纯数据模型在极端工况下外推能力弱的问题，嵌入热-电磁模型的数字孪生框架，实现发电机在复杂电网冲击下的虚拟-实体双向映射与闭环控制。

2）宏观运维数据与多物理尺度感知的深度融合，构建“预警-诊断-预测”的一体化体系。通过多传感器融合的全域监测技术，对齿轮箱和轴承状态进行精确监测，结合数字孪生技术与迁移学习方法解决故障样本稀缺及跨工况适应性分析难题，采用多目标动态优化自主完成精准故障诊断与预测，推动传动链监测向全生命周期精准健康管理与剩余寿命预测方向演进。

5.2.2　叶片状态监测与故障诊断技术发展趋势

未来将推动叶片的多物理场全状态智能监测与故障诊断技术发展，结合卫星信号传输技术与数字智能技术的发展，构建物理叶片同步演化的数字孪生模型，并在此基础上实现状态预测和故障预测，提升故障诊断的精度和效率。研究多源异构数据深度融合与强智能化的“端-边-云”协同诊断架构和体系，通过边缘智能器件在数据源头完成实时特征提取与初步诊断，实现最小诊断闭环。发展物理机理与数据驱动的数字孪生技术，突破数据黑箱，推动诊断模型向小样本学习、强泛化能力及可解释性方向演进。

5.2.3　系统健康状态监测技术发展趋势

系统健康状态监测与评估技术正由传统的离线静态验证向动态实时风险预警加速转变。未来发展将深度依托数字孪生与实时运行数据，构建失效物理模型与深度学习融合的混合评估框架，刻画复杂工况下的损伤演化规律；利用动态贝叶斯网络等方法持续更新故障概率，实现机组安全裕度的在线量化、可视化及灾变演化与连锁故障风险的精准推演。这一转变不仅能有效识别系统在极端环境下的薄弱环节，支撑风险防控策略优化，而且推动了运维模式从“事后判定、被动应对”向“事前预警、主动干预”的根本性跨越。

5.3　大型风电机组能量转换系统运行效率提升设计及控制技术发展趋势

5.3.1　大型风电机组能量转换系统运行效率提升设计技术

随着机组大型化，运行效率提升设计不再局限

于单一设备的优化，而是向着气动-机械-电磁深度协同的方向发展。

1）发电机系统高转矩密度与新材料应用技术。基于磁场调制原理的拓扑结构创新，研究超导材料与非晶复合软磁材料的大型风机发电机高转矩密度设计技术。通过磁场调制式电机拓扑结构和新型材料的复合应用，突破传统材料与构型的物理边界，融合高温超导技术使发电机损耗降至极低水平，实现在更小体积和重量下风力发电机转矩密度的进一步提高。

2）基于超宽禁带半导体与高集成度模块化的高功率密度变流器技术。针对模块化多电平变流器(modular multilevel converter, MMC)拓扑结构的深化研究，进一步提高发电系统的电压等级，通过大容量双极性器件集成门极换流晶闸管(integrated gate-commutated thyristor, IGCT)与新型超宽禁带半导体器件的协同应用，推动大型风电机组电气架构不断优化演进，进一步提高变流器系统功率密度。

3）推进电网友好型发电机系统技术。深入研究高压大功率发电机系统技术，通过高压并网提高机组的发电效率和功率密度，降低机组成本和损耗，实现风能的高效高质转化。深入研究直流风机技术，在风机内部采用直流母线收集电能，省去多重交流-直流转换环节，再通过高压直流输电并网，在远距离海上风电场有广泛的应用前景。

4）高效能量转换系统集成设计技术。机械传动装置的高效集成与无接触传动技术融合发展，传动链设计将向高度集成化与无接触化演进，一体化集成传动链设计技术将进一步深化，通过齿轮箱与发电机共用轴承、轴系与机壳的深度融合设计，大幅缩短传动链长度，减少中间连接部件带来的对中偏差与附加损耗。

5）开展永磁发电机与磁场调制式磁齿轮的一体化集成技术研究，构建高功率密度的磁齿轮复合电机新结构。通过共享磁场和关键部件实现深度耦合，提高其功率密度，并减少连接件、轴承和密封点，避免分体式连接带来的扭转振动与对中问题，实现系统动态性能可控。

6）叶片高效气动捕获与智能流动控制设计技术。针对超长柔性叶片气动弹性问题，未来的设计将从“被动适应”转向“主动控制”。通过在叶片表面集成微型传感器与致动器，实时感知并抑制流动分离，从而显著提升非定常风况下的气动效率。此外，通过推动仿生学与气动弹性剪裁技术融合发展，利用非线性气动弹性效应设计弯扭耦合结构，并模仿鸟类羽翼等生物特征优化翼型，在降低气动噪声的同时最大化风能捕获效率。

5.3.2 大型风电机组能量转换系统运行效率提升控制技术

1）发电机系统自适应损耗最小化高效率控制技术。针对大型机组宽转速、宽功率运行的特点，控制策略将向精细化损耗管理演进。结合在线参数辨识与损耗分项观测技术，将铜耗、铁耗、开关损耗及谐波附加损耗纳入统一目标函数进行动态寻优。在严格满足电流限幅、直流母线裕度与器件温升约束的前提下，实时计算最优电流矢量及开关频率。同时，引入小扰动在线搜索与模型预测控制，有效抑制动态寻优过程中的功率振荡，解决多电平拓扑与多并联通道工况下的环流损耗问题，实现电能转换效率的极致提升。

2）基于前馈与智能算法的精准高效变桨控制技术。为了突破大惯量叶片对风能捕获的滞后性限制，变桨控制将深度融合先进感知与智能决策，基于激光雷达的风特性前馈控制将成为未来风机的标配，通过提前感知来流风况，补偿变桨执行机构的动态延迟，使机组在湍流风况下仍能精准维持最佳叶尖速比，从而最大化气动捕获效率。此外，应用模型预测控制与人工智能算法，可在多目标优化框架下权衡“最大化风能捕获”与“最小化变桨动作能耗”，避免无效频繁变桨带来的执行机构自耗电增加，从而达到气动效率与执行效率的双重最优。

3）全生命周期能效最优系统级协同控制技术。控制目标将从单一时刻的“瞬时效率最高”扩展为“全生命周期发电量最大”的系统级协同。构建桨距-转矩-并网无功的深度协同控制架构，将机组的热循环寿命、绝缘电压应力与电网支撑需求转化为实时控制约束，动态分配各子系统的效率裕度。结合数字孪生与历史运行数据实时更新整机效率地图，采用滚动时域优化算法，在部分负载、电网调频调压及降载运行等非设计工况下持续挖掘效率增益，从而降低损耗波动，确保机组在全寿命周期内经济效益最大化。

6 结论

随着风电不断向着沙戈荒、深远海等复杂自然环境拓展，研究大型机组能量转换系统服役性能提

升技术对于增强机组的运行可靠性，提高发电量，降低运维成本等具有重要意义。本文围绕大型风电机组能量转换系统服役性能提升技术，从运行安全性、运行保障能力、运行效率 3 个层面，对主要的服役性能提升技术进行了总结和分析，包括大型风电机组能量转换系统的运行安全性分析、运行安全性提升设计及控制技术，关键部件及整机系统的状态监测与故障诊断技术，系统运行损耗分析、运行效率提升设计及控制技术。在此基础上，展望了大型风电机组能量转换系统服役性能提升技术的未来发展方向，为大型风电机组降本增效提供了可借鉴的思路。

参考文献　References

[1] 李　晖，刘　栋，姚丹阳. 面向碳达峰碳中和目标的我国电力系统发展研判[J]. 中国电机工程学报，2021，41(18)：6245-6259.
LI Hui, LIU Dong, YAO Danyang. Research on power system de-velopment in China towards carbon peak and carbon neutrality targets[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(18): 6245-6259.

[2] Global Wind Energy Council. Global wind report 2025[R]. Lisbon, Portugal: Global Wind Energy Council, 2025.

[3] 中国可再生能源学会风能专业委员会. 2024 年中国风电吊装容量统计简报[J]. 风能，2025(3)：48-63.
Chinese Wind Energy Association Wind Energy Professional Committee. Brief report on statistics of China's wind power installed capacity in 2024[J]. Wind Energy, 2025(3): 48-63.

[4] 黄　晟，凌吉莉，魏　娟，等. 大规模风电机群服役质量调控方法研究综述[J]. 电工技术学报，2025，40(10)：3274-3300.
HUANG Sheng, LIN Jili, WEI Juan, et al. Review of service quality regulation methods for large-scale wind farm clusters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(10): 3274-3300.

[5] 陈雪峰，郭艳婕，许才彬，等. 风电装备故障诊断与健康监测研究综述[J]. 中国机械工程，2020，31(2)：175-189.
CHEN Xuefeng, GUO Yanjie, XU Caibin, et al. Review on fault diagnosis and health monitoring of wind power equipment[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(2): 175-189.

[6] 姚　钢，杨浩猛，周荔丹，等. 大容量海上风电机组发展现状及关键技术[J]. 电力系统自动化，2021，45(21)：33-47.
YAO Gang, YANG Haomeng, ZHOU Lidan, et al. Development status and key technologies of large-capacity offshore wind tur-bines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(21): 33-47.

[7] EL-NAGGAR M F, ABDELHAMID A S, ELSHAHED M A, et al. Ranking subassemblies of wind energy conversion systems concerning their impact on the overall reliability[J]. IEEE Access, 2021, 9: 53754-53768.

[8] 张　弛. 风电机组部件故障风险评估方法研究[J]. 水电站机电技术，2024，47(6)：18-21.
ZHANG Chi. Research on failure risk assessment method for wind turbine components[J]. Mechanical & Electrical Technology of Hydropower Station, 2024, 47(6): 18-21.

[9] RACHIDI F, RUBINSTEIN M, MONTANYÀ J, et al. A review of current issues in lightning protection of new-generation wind-turbine blades[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2008, 55(6): 2489-2496.

[10] 赵洪山，林诗雨，曲岳晗，等. 考虑极端天气冲击过程的风电机组竞争失效可靠性评估[J]. 电力自动化设备，2024，44(4)：40-47.
ZHAO Hongshan, LIN Shiyu, QU Yuehan, et al. Reliability evaluation of wind turbines considering competitive failure during extreme weather impact[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(4): 40-47.

[11] QI J P, LI J H, FENG H, et al. Reliability assessment of wind power converter systems based on mission profiles and sub module life correlations[J]. IEEE Access, 2024, 12: 166162-166175.

[12] 葛新宇，毕俊喜，王　妍，等. 基于失效物理的风电机组多故障可靠性建模方法[J]. 科学技术与工程，2024，24(15)：6281-6289.
GE Xinyu, BI Junxi, WANG Yan, et al. Reliability modeling method for wind turbines with multiple failures based on physics of failure[J]. Science Technology and Engineering, 2024, 24(15): 6281-6289.

[13] 吴淼杰. 风机主轴承弹流脂润滑建模及可靠性分析[D]. 长沙：湖南大学，2023.
WU Miaojie. Elastohydrodynamic grease lubrication modeling and reliability analysis of wind turbine main bearing[D]. Changsha, China: Hunan University, 2023.

[14] NASIRI-ZARANDI R, AJAMLOO A M, ABBASZADEH K. Design optimization of a transverse flux halbach-array PM generator for direct drive wind turbines[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2020, 35(3): 1485-1493.

[15] ZHANG X, LIU X, CHEN Z. A novel dual-flux-modulator coaxial magnetic gear for high torque capability[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2018, 33(2): 682-691.

[16] 孙玉华，赵文祥，吉敬华，等. 高转矩性能多相组永磁电机及其关键技术综述[J]. 电工技术学报，2023，38(6)：1403-1420.
SUN Yuhua, ZHAO Wenxiang, JI Jinghua, et al. Review on high torque performance multi-phase permanent magnet machines and key technologies[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1403-1420.

[17] 张　岳，王凤翔. 半直驱永磁风力发电机多相绕组结构设计及性能分析[J]. 微特电机，2014，42(3)：33-35.
ZHANG Yue, WANG Fengxiang. Structure design and performance analysis of multi-phase winding for semi-direct drive permanent magnet wind generator[J]. Micromotors, 2014, 42(3): 33-35.

[18] 饶志蒙. 模块化多三相永磁风力发电机设计及其控制研究[D]. 长沙：湖南大学，2021.
RAO Zhimeng. Design and control research of modular mul-ti-three-phase permanent magnet wind generator[D]. Changsha, China: Hunan University, 2021.

[19] 王秀云，解媛媛，王汝田，等. 一种三相双输出有源中点钳位型三电平变换器[J]. 电工技术学报，2024，39(18)：5786-5799，5854.
WANG Xiuyun, XIE Yuanyuan, WANG Rutian, et al. A three-phase dual-output active neutral-point-clamped three-level converter[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(18): 5786-5799.

[20] 赵相霖，李卫超，周　亮. 基于平移调制波的三电平有源中点钳位逆变器容错下中点电位平衡策略[J]. 电工技术学报，2025，40(1)：112-124.
ZHAO Xianglin, LI Weichao, ZHOU Liang. Neutral point potential balance strategy of three-level active neutral point clamped inverter under fault tolerance based on translation modulation wave[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(1): 112-124.

[21] LI J, BHATTACHARYA S, HUANG A Q. A new nine-level active NPC (ANPC) converter for grid connection of large wind turbines for distributed generation[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 961-972.

[22] 朱东海，李湘金雯，王煜坤，等. 新能源变流器多机并联系统暂态同步稳定性评估与参数优化[J]. 中国电机工程学报，2025，45(2)：452-465.
ZHU Donghai, LI Xiangjinwen, WANG Yukun, et al. Transient synchronization stability assessment and parameter optimization of multi-machine parallel system of renewable energy converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(2): 452-465.

[23] 陈　根，蔡　旭. 提升并联型风电变流器运行效率的自适应功率优化控制[J]. 中国电机工程学报，2017，37(22)：6492-6499，6761.
CHEN Gen, CAI Xu. Adaptive power optimization control for im-proving operation efficiency of parallel wind power converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(22): 6492-6499.

[24] TARAS P, NILIFARD R, ZHU Z Q, et al. Cooling techniques in direct-drive generators for wind power application[J]. Energies, 2022, 15(16).

[25] WANG K, HUANG S, ZHANG J, et al. An effective cooling scheme using micro heat pipe array for electrical machines with distributed windings[J]. IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2025, 11(2): 5891-5900.

[26] JI Y, GIANGRANDE P, ZHAO W, et al. Effect of environmental and operating conditions on partial discharge activity in electrical machine insulation: a comprehensive review[J]. Energies, 2024, 17(16).

[27] KHANALI M, JAYARAM S. Dielectric frequency response of transformer insulation system under high-dV/dt stresses[C]//2015 IEEE 11th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Sydney, Australia: IEEE, 2015: 408-411.

[28] ZHANG Z, CHEN A, MATVEEV A, et al. High-power generators for offshore wind turbines[J]. Energy Procedia, 2013, 35: 52-61.

[29] 赵仕林，杨金龙，童　颜，等. 海上风电变流器 IGBT 模块腐蚀与防护研究进展[J]. 材料导报，2023，37(增刊 2)：407-413.
ZHAO Shilin, YANG Jinlong, TONG Yan, et al. Research progress on corrosion and protection of IGBT modules for offshore wind power converters[J]. Materials Reports, 2023, 37(S2): 407-413.

[30] 张建文，陈　根，蔡　旭，等. 基于热控制的海上风电变流器主动防凝露技术[J]. 中国电机工程学，2019，39(9)：2748-2757.
ZHANG Jianwen, CHEN Gen, CAI Xu, et al. Active anti-condensation technology of offshore wind power converter based on thermal control[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(9): 2748-2757.

[31] 北京金风科创风电设备有限公司. 功率模块及其并联装置、变流器以及控制方法：201710508333.9[P]. 2020-03-27.
Beijing Goldwind Science & Creation Wind Power Equipment Co., Ltd. Power module and its parallel device, converter and control method: 201710508333.9[P]. 2020-03-27.

[32] 陈岩松，朱才朝，谭建军，等. 多工况下兆瓦级海上风电齿轮箱均载性能优化设计[J]. 重庆大学学报，2022，45(9)：1-14.
CHEN Yansong, ZHU Caichao, TAN Jianjun, et al. Optimization design of load sharing performance of megawatt offshore wind turbine gearbox under multiple operating conditions[J]. Journal of Chongqing University, 2022, 45(9): 1-14.

[33] 王金娜，仇虎子，何宽宏. 风电齿轮箱载荷分析及负载效应研究综述[J]. 机械研究与应用，2024，37(6)：168-171.
WANG Jinna, QIU Huzi, HE Kuanhong. Review on load analysis and load effect of wind turbine gearbox[J]. Mechanical Research & Application, 2024, 37(6): 168-171.

[34] NEJAD A R, KELLER J, GUO Y, et al. Wind turbine drivetrains: state-of-the-art technologies and future development trends[J]. Wind Energy Science, 2022, 7(1): 387-411.

[35] WINFREE D D. Reducing gear windage losses from high speed gears and applying these principles to actual running hardware[C]//ASME 2013 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, 2014.

[36] KARMI B, SAOUAB A, GUERINE A, et al. Reliability based design optimization of a two-stage wind turbine gearbox[J]. Mechanics & Industry, 2024, 25: 16.

[37] 郑林征. 风电主轴轴承接触分析及优化设计[D]. 大连：大连理工大学，2016.
ZHENG Linzheng. Contact analysis and optimization design of wind turbine main shaft bearing[D]. Dalian, China: Dalian University of Technology, 2016.

[38] GAO L, HU H. Wind turbine icing characteristics and icing-induced power losses to utility-scale wind turbines[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2021, 118(36): e2111461118.

[39] 胡　琴，王　欢，舒立春，等. 覆冰条件下风力发电机叶片防/除冰方法综述[J]. 电工技术学报，2024，39(17)：5482-5496.
HU Qin, WANG Huan, SHU Lichun, et al. Review of an-ti-icing/de-icing methods for wind turbine blades under icing con-ditions[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(17): 5482-5496.

[40] LAMRAOUI F, FORTIN G, BENOIT R, et al. Atmospheric icing impact on wind turbine production[J]. Cold Regions Science and Technology, 2014, 100: 36-49.

[41] XIE T, DONG J, CHEN H, et al. Experimental investigation of deicing characteristics using hot air as heat source[J]. Applied Thermal Engineering, 2016, 107: 681-688.

[42] LIU Z, LI X, YANG S, et al. Study on ice melting state changes and energy consumption in electrothermal anti-icing process of wind turbine blades[J]. Renewable Energy, 2026, 256: 124724.

[43] PENG C, CHEN Z, TIWARI M K. All-organic superhydrophobic coatings with mechanochemical robustness and liquid impalement resistance[J]. Nature Materials, 2018, 17(4): 355-360.

[44] GOLOVIN K, DHYANI A, THOULESS M D, et al. Low-interfacial toughness materials for effective large-scale deicing[J]. Science, 2019, 364(6438): 371-375.

[45] PENG S, YAO F, HUANG H, et al. Low-light/low-power de-icing composite coatings with thermal insulation and tunable optical radiation absorption for all-weather anti-icing of wind turbine blades[J]. Chemical Engineering Journal, 2025, 512: 162061.

[46] 株洲时代新材料科技股份有限公司. 大功率风力发电机叶片模块化气热抗冰方法及安装方法：CN105402090B[P]. 2017-12-08.
Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd. Modular gas-thermal anti-icing method and installation method for high-power wind turbine blades: CN105402090B[P]. 2017-12-08.

[47] 株洲时代新材料科技股份有限公司. 一种抗冰风电叶片结构：中国，CN 105626370 B[P]. 2018-02-16.
Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd. An anti-icing wind turbine blade structure: CN 105626370B[P]. 2018-02-16.

[48] 湖南中大智洁科技有限公司. 一种基于 MXene 的除冰超疏水涂料、涂层及制备方法与涂层应用：202510383403.7[P]. 2025-11-21.
Hunan Zhongda Zhijie Technology Co., Ltd. A MXene-based de-icing superhydrophobic coating, coating preparation method and coating application: 202510383403.7[P]. 2025-11-21.

[49] 施广全. 风力发电机级雷电致灾机理及其防护方法研究[D]. 南京：南京信息工程大学，2019.
SHI Guangquan. Research on lightning disaster mechanism and protection method of wind turbine[D]. Nanjing, China: Nanjing University of Information Science & Technology, 2019.

[50] YANG H, PENG Y, TAO X, et al. A direct lightning protection method for wind turbine blades through the design of metal mesh[C]//2025 IEEE 20th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA). Yantai, China: IEEE, 2025: 1-5. DOI: 10.1109/ICIEA65512.2025.11148802.

[51] 株洲时代新材料科技股份有限公司. 一种风电叶片防雷系统及防雷风电叶片：CN202110003462.9[P]. 2021-11-16.
Zhuzhou Times New Material Technology Co., Ltd. A lightning protection system for wind turbine blades and lightning protection wind turbine blade: CN202110003462.9[P]. 2021-11-16.

[52] 陈炜炜，周懋坤，詹跃东，等. 雷电流数学模型仿真及对比分析[J]. 电瓷避雷器，2019(6)：7-12.
CHEN Weiwei, ZHOU Maokun, ZHAN Yuedong, et al. Simulation and comparative analysis of lightning current mathematical mod-els[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(6): 7-12.

[53] 黄煜涛，夏能弘，阮庆洲. 风机叶片-轮毂连接引下线及其接线端子雷击电磁热-力特性分析及结构改进[J]. 电瓷避雷器，2025(1)：1-9.
HUANG Yutao, XIA Nenghong, RUAN Qingzhou. Analysis of electromagnetic-thermal-mechanical characteristics of lightning strike on wind turbine blade-hub connection down-conductor and its terminal and structure improvement[J]. Insulators and Surge Arresters, 2025(1): 1-9.

[54] 陈　庆. 风电机组的电气接地特性研究[D]. 北京：北京交通大学，2020.
CHEN Qing. Research on electrical grounding characteristics of wind turbines[D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2020.

[55] 张　波，薛惠中，张宝全，等. 雷击风机时叶片和塔筒对接地装置冲击接地特性的影响[J]. 高电压技术，2012，38(10)：2675-2682.
ZHANG Bo, XUE Huizhong, ZHANG Baoquan, et al. Impact of blade and tower on impulse grounding characteristics of grounding device when lightning strikes wind turbine[J]. High Voltage Engi-neering, 2012, 38(10): 2675-2682.

[56] ZANJANI J S M, BARAN I, AKKERMAN R. Combatting rain erosion of offshore wind turbine blades by co-bonded thermoplastic-thermoset hybrid composites[C]//IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. [S.l.]: IOP Publishing, 2020, 942(1): 012024.

[57] KATSIVALIS I, THOMSEN C L, JØRGENSEN J K, et al. Mechanical and interfacial characterization of leading-edge protection materials for wind turbine blade applications[J]. Wind Energy, 2022, 25(10): 1758-1774.

[58] OUACHAN I, DYER K, HAMERTON I, et al. Engineering viscoelastic properties in polyurethane coatings to reduce erosion risks in wind turbine blades[J]. SAMPE Journal, 2021, 57(3): 16-24.

[59] GODFREY M, KARIMI M, MEYER N, et al. The effect of temperature on the erosion of polyurethane coatings for wind turbine leading edge protection[J]. Wear, 2021, 476: 203720.

[60] 舒忠虎，何建军，段焱森，等. 复合氟化改性制备 EP-ZnO 纳米超疏水涂层的研究[J]. 材料导报，2021，35(增刊 2)：56-59.
SHU Zhonghu, HE Jianjun, DUAN Yansen, et al. Study on prepa-ration of EP-ZnO nano superhydrophobic coating by composite fluorination modification[J]. Materials Reports, 2021, 35(Supplement 2): 56-59.

[61] PATHAK S M, PRAVEEN KUMAR V, VENKATARAMAN B, et al. Solid particle erosion performances of ceramic nanoparticles reinforced water-based polyurethane coatings for wind turbine application[J]. Ceramics International, 2022, 48(23): 35788-35798.

[62] 王琛琛. 碳纤维树脂基复合材料 RTM 制备及其耐腐蚀性能研究[D]. 沈阳：沈阳理工大学，2023.
WANG Chenchen. Research on RTM preparation and corrosion re-sistance of carbon fiber resin matrix composites[D]. Shenyang, China: Shenyang Ligong University, 2023.

[63] JOHANSEN N F N, MISHNAEVSKY L Jr, DASIKAR A, et al. Nanoengineered graphene reinforced coating for leading edge protection of wind turbine blades[J]. Coatings, 2021, 11(9): 1104.

[64] DASIKAR A, JOHANSEN N F N, MISHNAEVSKY L Jr, et al. Graphene sol gel modified polyurethane coating materials: properties and performance[J]. Polymers and Polymer Composites, 2022, 30: 1-18.

[65] 甄　琦，陈松利，万大千，等. 挟沙风对风力发电机叶片冲蚀磨损的数值研究[J]. 太阳能学报，2022，43(7)：257-263..
ZHEN Qi, CHEN Songli, WAN Daqian, et al. Numerical study on erosion wear of wind turbine blades by sand-laden wind[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(7): 257-263.

[66] ZHANG Y, MA J, WU C, et al. Effects of moisture ingress on the mesoscale mechanical property of epoxy adhesives under elevated temperature[J]. Polymer Testing, 2021, 93: 106940.

[67] RAD S D, MISHNAEVSKY L Jr. Rain erosion of wind turbine blades: computational analysis of parameters controlling the surface degradation[J]. Meccanica, 2020, 55(4): 725-743.

[68] 刘　航，王　跃，刘永慧，等. 基于定量设计虚拟阻抗的 VSG 低电压穿越策略[J]. 高电压技术，2022，48(1)：245-256.
LIU Hang, WANG Yue, LIU Yonghui, et al. Low voltage ride through strategy of VSG based on quantitative design virtual impedance[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 245-256.

[69] 李清辉，葛平娟，肖　凡，等. 基于功角与电流灵活调控的 VSG 故障穿越方法研究[J]. 中国电机工程学报，2020，40(7)：2071-2080，2387.
LI Qinghui, GE Pingjuan, XIAO Fan, et al. Research on VSG fault ride through method based on flexible regulation of power angle and current[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2071-2080, 2387.

[70] SHUAI Z, SHEN C, LIU X, et al. Transient angle stability of virtual synchronous generators using Lyapunov's direct method[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 10(4): 4648-4661.

[71] 张　宇，张　琛，蔡　旭，等. 虚拟同步机电流受限暂态电压支撑机理与改进故障穿越控制研究[J]. 中国电机工程学报，2024，44(15)：5996-6010.
ZHANG Yu, ZHANG Chen, CAI Xu, et al. Research on current limited transient voltage support mechanism and improved fault ride through control of virtual synchronous generator[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(15): 5996-6010.

[72] PENG H, ZHOU X, ZHANG L, et al. A current-limiting method based on two-stage adaptive virtual impedance for improved grid-supporting capability of grid-forming inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(5): 6539-6554..

[73] FENG G, LU Y, LAI C, et al. Fault tolerant maximum torque per ampere (FT-MTPA) control for dual three-phase interior PMSMs under open-phase fault[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2022, 69(12): 12030-12041.

[74] 郝振洋，胡育文，黄文新，等. 永磁容错电机最优电流直接控制策略. 中国电机工程学报，2011，31(6)：46-51.
HAO Zhenyang, HU Yuwen, HUANG Wenxin, et al. Optimal direct current control strategy for permanent magnet fault-tolerant mo-tor[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(6): 46-51.

[75] ZHENG B, ZOU J, LI B, et al. Analysis and fault-tolerant control for dual-three-phase PMSM based on virtual healthy model[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(12): 15411-15424.

[76] LI W, SONG P, LI Q, et al. Open-phase fault modeling for dual

three-phase PMSM using vector space decomposition and negative sequence components[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2022, 58(8): 8204106.

[77] WU Z, CHENG C W, HUA W, et al. A novel square-wave voltage injection based sensorless control method robust to single open-phase fault for dual three phase IPM[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(6): 7514-7524

[78] LIU Y, HUANG S, LIAO W, et al. Single-phase open-circuit fault-tolerant direct torque control for dual three-phase PMSM based on SVPWM[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2024, 12(5): 5235-5245.

[79] LEITHEAD W E, NEILSON V, DOMINGUEZ S. Alleviation of unbalanced rotor loads by single blade controllers[C]//European Wind Energy Conference & Exhibition (EWEC) 2009. Marseilles, France: Curran Associates, Inc., 2009: 576-615.

[80] 陈金林. 基于神经网络的风电机组变桨距优化控制研究[D]. 株洲：湖南工业大学，2019.
CHEN Jinlin. Research on pitch optimization control of wind tur-bine based on neural network[D]. Zhuzhou, China: Hunan University of Technology, 2019.

[81] SIERRA G, JESUS E, SANTOS M. Lookup table and neural network hybrid strategy for wind turbine pitch control[J]. Sustainability, 2021, 13(6): 3235.

[82] PETROVIÉ V, BOTTASSO C L. Wind turbine envelope protection control over the full wind speed range[J]. Renewable Energy, 2017, 111: 836-848

[83] 许波峰，戴成军，蒋　澎. 基于独立变桨控制的台风下风电机组停机载荷分析[J]. 可再生能源，2022，40(6)：787-791.
XU Bofeng, DAI Chengjun, JIANG Peng. Shutdown load analysis of wind turbine under typhoon based on individual pitch control[J]. Renewable Energy Resources, 2022, 40(6): 787-791.

[84] 黄守道，张一凡，冯垚径，等. 永磁风力发电机技术发展综述[J]. 电气工程学报，2025，20(4)：23-42.
HUANG Shoudao, ZHANG Yifan, FENG Yaojing, et al. Review on development of permanent magnet wind generator technology[J]. Journal of Electrical Engineering, 2025, 20(4): 23-42.

[85] 魏书荣，周海林，符　杨，等. 基于温度热模型与数据融合驱动的海上风力发电机故障早期预警[J]. 高电压技术，2025，51(1)：245-256.
WEI Shurong, ZHOU Hailin, FU Yang, et al. Early warning of offshore wind generator fault driven by thermal model and data fusion[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(1): 245-256.

[86] 朱广贺，朱智强，袁逸萍. 基于振动传感器的风力发电机故障检测算法[J]. 传感技术学报，2023，36(1)：108-112.
ZHU Guanghe, ZHU Zhiqiang, YUAN Yiping. Fault detection al-gorithm of wind generator based on vibration sensor[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2023, 36(1): 108-112.

[87] QU Y, WANG X, ZHANG X, et al. An adaptive method for multifault diagnosis of induction motor under sharp changing speed and load condition[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2023, 20(3): 10.

[88] ESTIMA J O, CARDOSO A J M. A new algorithm for real-time multiple open-circuit fault diagnosis in voltage-fed PWM motor drives by the reference current errors[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(8): 3496-3505..

[89] XU S, TAO S, ZHENG W, et al. Multiple open-circuit fault diagnosis for back-to-back converter of PMSG wind generation system based on instantaneous amplitude estimation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-13.

[90] LI Z, WHEELER P, WATSON A, et al. A fast diagnosis method for both IGBT faults and current sensor faults in grid-tied three-phase inverters with two current sensors[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(5): 5267-5278.

[91] 龙　寰，杨　婷，徐劭辉，等. 基于数据驱动的风电机组状态监测与故障诊断技术综述[J]. 电力系统自动化，2023，47(23)：55-69.
LONG Huan, YANG Ting, XU Shaohui, et al. Review on data-driven condition monitoring and fault diagnosis technology for wind tur-bines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23): 55-69.

[92] KONG Z, TANG B, DENG L, et al. Condition monitoring of wind turbines based on spatio-temporal fusion of SCADA data by convolutional neural networks and gated recurrent units[J]. Renewable Energy, 2020, 146: 760-768.

[93] REN H, LIU W Y, SHAN M C, et al. A novel wind turbine health condition monitoring method based on composite variational mode entropy and weighted distribution adaptation[J]. Renewable Energy, 2021, 168: 972-980.

[94] WEN L, LI X Y, GAO L, et al. A new convolutional neural network-based data-driven fault diagnosis method[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(7): 5990-5998.

[95] 尹晓伟，姜雪峰，王龙福. 风电机组轴承故障诊断与疲劳寿命研究综述[J]. 太阳能学报，2022，43(5).
YIN Xiaowei, JIANG Xuefeng, WANG Longfu. Review on bearing fault diagnosis and fatigue life of wind turbines[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(5): 300-310.

[96] ZHU Y C, ZHU C C, TAN J J, et al. Operational state assessment of wind turbine gearbox based on long short-term memory networks and fuzzy synthesis[J]. Renewable Energy, 2022, 181: 1167-1176.

[97] 张立彬. 基于云台拍摄图像的风电叶片表面损伤检测研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨理工大学，2022.
ZHANG Libin. Research on surface damage detection of wind tur-bine blades based on images taken by PTZ camera[D]. Harbin, China: Harbin University of Science and Technology, 2022.

[98] TANG J, SOUA S, MARES C, et al. An experimental study of acoustic emission methodology for in service condition monitoring of wind turbine blades[J]. Renewable Energy, 2016, 99: 170-179.

[99] YANG R, HE Y, ZHANG H. Progress and trends in nondestructive testing and evaluation for wind turbine composite blade[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 1225-1250.

[100] 绳晓玲，万书亭，李永刚，等. 基于坐标变换的双馈风力发电机组叶片质量不平衡故障诊断[J]. 电工技术学报，2016，31(7)：188-197.
SHENG Xiaoling, WAN Shuting, LI Yonggang, et al. Fault diagnosis for blade mass imbalance of wind turbines with DFIG based on coordinate transformation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(7): 188-197.

[101] 崔逊航. 基于改进LightGBM的风力发电机组叶片故障预测算法研究[D]. 重庆：重庆邮电大学，2021.
CUI Xunhang. Research on wind turbine blade fault prediction al-gorithm based on improved LightGBM[D]. Chongqing, China: Chongqing University of Posts and Telecommunications, 2021.

[102] WANG L, ZHANG Z, XU J, et al. Wind turbine blade breakage monitoring with deep autoencoders[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(4): 2824-2833.

[103] WANG L, ZHANG Z. Automatic detection of wind turbine blade surface cracks based on UAV-taken images[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(9): 7293-7303.

[104] 郭煜涛，谢丽蓉，包洪印，等. 基于多参数融合和组合赋权的风电机组健康状态评估[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文)，2022，

39(1)：119-128.
GUO Yutao, XIE Lirong, BAO Hongyin, et al. Health status as-sessment of wind turbines based on multi-parameter fusion and combined weighting[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition in Chinese and English), 2022, 39(1): 119-128.

[105] 胡姚刚，李　辉，刘海涛，等. 基于多类证据体方法的风电机组健康状态评估[J]. 太阳能学报，2018，39(2)：331-341.
HU Yaogang, LI Hui, LIU Haitao, et al. Health status assessment of wind turbines based on multi-class evidential reasoning method[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2018, 39(2): 331-341.

[106] 薛邵锴，秦文萍，张东霞，等. 基于模型数据混合驱动的大规模双馈风电场并网数字孪生建模[J]. 高电压技术，2024，50(3)：1025-1033.
XUE Shaokai, QIN Wenping, ZHANG Dongxia, et al. Digital twin modeling for grid-connected large-scale doubly fed wind farms based on model-data hybrid drive[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1025-1033.

[107] 李进友，李　媛，冯　冰，等. 基于随机组合赋权模糊评价的风电机组健康状态评估[J]. 太阳能学报，2022，43(8)：340-351.
LI Jinyou, LI Yuan, FENG Bing, et al. Health status assessment of wind turbines based on random combination weighting fuzzy evaluation[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2022, 43(8): 340-351.

[108] CHENG X, HAO J, LI Y, et al. A Three-level service quality index system for wind turbine groups based on fuzzy comprehensive evaluation[J]. Technologies, 2024, 12(11): 34.

[109] 张浩博. 基于 SCADA 数据的风电机组健康状态评估方法研究[D]. 北京：华北电力大学(北京)，2024.
ZHANG Haobo. Research on health status assessment method of wind turbine based on SCADA data[D]. Beijing, China: North China Elec-tric Power University, 2024.

[110] 林　涛，赵成林，刘航鹏，等. 基于改进栈式自编码器的风电机组发电机健康评估[J]. 计算机工程与科学，2020，42(3)：517-522.
LIN Tao, ZHAO Chengling, LIU Hangpeng, et al. Generator health assessment of wind turbine based on improved stacked autoencoder[J]. Computer Engineering and Science, 2020, 42(3): 517-522.

[111] 张扬帆，王　玓，李　阳，等. 基于云-边-端协同的区域级风电场大数据中心数据管理框架及优化运行方法[J]. 高电压技术，2024，50(11)：5151-5163.
ZHANG Yangfan, WANG Yu, LI Yang, et al. Data management framework and operation optimization method for regional wind farms big data center based on cloud-edge-end collaboration[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(11): 5151-5163.

[112] 尹宏乾. 基于子域法的永磁体周向分段式转子涡流损耗解析模型[J]. 船电技术，2024，44(2)：59-64，71.
YIN Hongqian. Analytical model of rotor eddy current loss for circumferentially segmented permanent magnet based on sub-domain method[J]. Marine Electric & Electronic Technology, 2024, 44(2): 59-64, 71.

[113] 吴胜男，郝大全，佟文明. 基于等效热网络法和 CFD 法高速永磁同步电机热计算研究[J]. 电机与控制学报，2022，26(7)：29-36.
WU Shengnan, HAO Daquan, TONG Wenming. Research on thermal calculation of high speed permanent magnet synchronous motor based on equivalent thermal network method and CFD method[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(7): 29-36.

[114] 刘宝成. 考虑实际运行工况的风电变流器 IGBT 温升热特性研究[D]. 北京：北京交通大学，2023.
LIU Baocheng. Research on thermal characteristics of IGBT temperature rise in wind power converters considering actual operating conditions[D]. Beijing, China: Beijing Jiaotong University, 2023.

[115] 龚梓轩，黄云辉，朱建行，等. 不对称电网下的构网型变流器线性周期时变建模及稳定性分析[J/OL]. 高电压技术，2026：1-11 [2026-01-28]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20251215.
GONG Zixuan, HUANG Yunhui, ZHU Jianhang, et al. Linear time-periodic modeling and stability analysis of grid-forming converters under unbalanced grid conditions[J/OL]. High Voltage Engineering, 2026: 1-11[2026-01-28]. https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve. 20251038.

[116] FERNANDES C, BLAZQUEZL, SANESTEBAN J, et al. Energy efficiency tests in a full scale wind turbine gearbox[J]. Tribology international, 2016, 101: 375-382.

[117] SEQUEIRA C, PACHECO A, GALEGO P, et al. Analysis of the efficiency of wind turbine gearboxes using the temperature variable[J]. Renewable energy, 2019, 135: 465-472.

[118] JUNG S, KANG D, PALANIMUTHU K, et al. Design of 20 MW direct-drive permanent magnet synchronous generators for wind turbines based on constrained many-objective optimization[J]. Wind Energy, 2024, 27(9): 847-872.

[119] ANTONELLO F, BUONGIORNO J, ZIO E. Physics informed neural networks for surrogate modeling of accidental scenarios in nuclear power plants[J]. Nuclear Engineering and Technology, 2023, 55(9): 3409-3416.

[120] 高　剑，黄守道，张文娟，等. 基于变流器控制策略的直驱永磁风力发电机优化设计[J]. 电工技术学报，2013，28(7)：103-109.
GAO Jian, HUANG Shoudao, ZHANG Wenjuan, et al. Optimization design of direct-drive permanent magnet wind generator based on converter control strategy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(7): 103-109.

[121] 湖南大学. 一种直驱永磁风力发电机多工况全局效率最优设计方法：201510585567.4[P]. 2017-02-08.
Hunan University. A global efficiency optimization design method for direct-drive permanent magnet wind generator under multi-operating conditions: China, 201510585567.4[P]. 2017-02-08.

[122] 杨恩星，仇志凌，陈国柱，等. 基于载波移相并联的直驱风力发电并网变流器控制策略[J]. 中国电机工程学报，2009，29(21)：8-13.
YANG Enxing, QIU Zhiling, CHEN Guozhu, et al. Control strategy of grid-connected converter for direct-drive wind power generation based on carrier phase-shifted parallel connection[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(21): 8-13.

[123] 刘盛福. 非隔离型两台并联变流器高性能调制策略研究[D]. 杭州：浙江大学，2022.
LIU Shengfu. Research on high-performance modulation strategy for two paralleled non-isolated converters[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University, 2022.

[124] 李　凯，郑　宏，马　兰，等. 基于有效零矢量脉宽调制和 PR 控制的并联零序环流抑制[J]. 电力系统自动化，2015，39(15)：126-131，148.
LI Kai, ZHENG Hong, MA Lan, et al. Suppression of zero-sequence circulating current in paralleled converters based on effective zero-vector PWM and PR control[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 126-131, 148.

[125] 杨　航，周羽生，许振华，等. 基于储能和序分量控制的直驱永磁风电系统非对称故障穿越研究[J]. 电力系统保护与控制，2022，50(2)：60-68.
YANG Hang, ZHOU Yusheng, XU Zhenhua, et al. Asymmetrical fault ride-through of direct-drive permanent magnet wind power system based on energy storage and sequence-component control[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(2): 60-68.

[126] 崔海旭. 2 MW 风力发电机齿轮箱输出端不对中故障动力学仿真

[D]. 包头：内蒙古科技大学，2019.
CUI Haixu. Dynamic simulation of output misalignment fault of 2 MW wind turbine gear box[D]. Baotou, China: Inner Mongolia University of Science and Technology, 2019.
[127] ABB Ltd. Medium speed permanent magnet generator (MS PMG) for wind power[R]. Zurich, Switzerland: ABB Ltd, 2012.
[128] Envision Energy launches fully integrated drivetrain for offshore wind turbines[EB/OL]. Windtech International, 2025-02-14[2025-02-15]. https://www.windtech-international.com/product-news/envision-energy-launches-fully-integrated-drivetrain-for-offshore-wind-turbines.
[129] 湖南大学. 一种传动链系统智能反演优化方法：202210566017.8[P]. 2022-08-09.
Hunan University. An intelligent inversion optimization method for drivetrain system: China, 202210566017.8[P]. 2022-08-09.
[130] 宋 俊. 风力机空气动力学[M]. 北京：机械工业出版社，2019：98-101.
SONG Jun. Wind Turbine Aerodynamics[M]. Beijing, China: China Machine Press, 2019: 98-101.
[131] HICKS R, HENNE P. Wing design by numerical optimization[C]//American Institute of Aeronautics and Astronautics. Reston, Virigina: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1977.
[132] 陈 进，陆群峰，王旭东，等. 基于自适应遗传算法的风力机通用翼型的优化设计研究[J]. 中国机械工程，2009，20(20)：2448-2451，2469.
CHEN Jin, LU Qunfeng, WANG Xudong, et al. Research on optimal design of general airfoils for wind turbines based on adaptive genetic algorithm[J]. China Mechanical Engineering, 2009, 20(20): 2448-2451, 2469.
[133] DRELA MARK. Lecture Notes in Engineering[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 1989: 1-12.
[134] MORGADO J, VIZINHO R, SILVESTRE M A R, et al. XFOIL vs CFD performance predictions for high lift low Reynolds number airfoils[J]. Aerospace Science & Technology, 2016: 207-214.
[135] HUANG J, WANG B, YU H, et al. Improved MTPA control strategy with adaptive gain for permanent magnet synchronous reluctance motors[C]//2024 27th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). Fukuoka, Japan: IEEE, 2024: 43-48.
[136] WANG Z, HU J, ZHAO M. IPMSMs sensorless MTPA control based on virtual q-axis inductance and triple frequency notch filter[C]//2024 IEEE 7th International Electrical and Energy Conference (CIEEC). Harbin, China: IEEE, 2024: 1129-1134.
[137] 张永刚. 大功率永磁同步电机发电运行状态下的单位功率因数控制研究[J]. 电气自动化，2017，39(36)：15-17.
ZHANG Yonggang. Research on unity power factor control of high power permanent magnet synchronous generator in generation operation state[J]. Electrical Automation, 2017, 39(36): 15-17.
[138] 赵剑飞，向 茜，王 爽. 电动车用模块化轴向磁通永磁同步电机宽转速范围效率优化控制方法[J]. 中国电机工程学报，2023，43(14)：5634-5643.
ZHAO Jianfei, XIANG Qian, WANG Shuang. Efficiency optimization control method of modular axial flux permanent magnet synchronous motor for electric vehicles in wide speed range[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5634-5643.
[139] 范志翔，丁石川，杭 俊，等. 无需求解最优参考电流的内置式永磁同步电机驱动系统最小损耗模型预测控制方法[J]. 中国电机工程学报，2025，45(16)：6517-6526.
FAN Zhixiang, DING Shichuan, HANG Jun, et al. Minimum loss model predictive control method for interior permanent magnet synchronous motor drive system without solving optimal reference current[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(16): 6517-6526.
[140] LEE J, NAM K, CHOI S, et al. Loss-minimizing control of PMSM with the use of polynomial approximations[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(3/4): 1071-1082.
[141] KABOLI S, ZOLGHADRI M R, VAHDATI-KHAJEH E. A fast flux search controller for DTC-based induction motor drives[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(5): 2407-2416.
[142] LIANG G, LIAO W, ZHANG Z Y, et al. An optimized pulsewidth modulation for dual three-phase PMSM under low carrier ratio[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(3): 3062-3072.
[143] MUNTEANU I, CUTULULIS N A, BRATCU A I, et al. Optimization of variable speed wind power systems based on a LQG approach[J]. Control Engineering Practice, 2005, 13(7): 903-912.
[144] 岑富林. 基于模糊逻辑的直驱风电机组变桨距控制[D]. 长沙：湖南大学，2016.
CEN Fulin. Pitch control of direct-drive wind turbine based on fuzzy logic[D]. Changsha, China: Hunan University, 2016.
[145] 周腊吾，邓宁峰，陈 浩，等. 基于 ACA-PID 算法的风机独立变桨控制[J]. 电力系统保护与控制，2016，44(15)：99-105.
ZHOU Lawu, DENG Ningfeng, CHEN Hao, et al. Individual pitch control of wind turbine based on ACA-PID algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 99-105.



黄守道
1962—，男，博士，教授，博导
主要从事风力发电技术、特种电机及其控制技术研究工作
E-mail: hsd1962@hnu.edu.cn
HUANG Shoudao
Ph.D., Professor



屈尹鹏(通信作者)
1991—，男，博士，助理教授
主要从事复杂机电系统服役质量监控、新能源功率预测研究工作
E-mail: quyinpeng@hnu.edu.cn
QU Yinpeng
Ph.D.
Corresponding author

收稿日期 2025-05-16 修回日期 2026-01-29 编辑 何秋萍