热带海洋环境下风电设备传动系统失效机理研究现状与展望

刘世豪[1,2*] 邱 娜[1,2] 林 茂[1]
1.海南大学机电工程学院,海口,570228
2.热带海洋工程材料及评价全国重点实验室,海口,570228

摘要:热带海洋风电是全球可再生能源战略核心领域,其高盐雾、高湿度、高温、强台风及强紫外的极端环境,使风电设备传动系统失效概率较陆上增加35%以上,核心部件寿命缩短近50%,成为制约工程化规模化落地的关键瓶颈。基于国内外文献、行业权威报告及热带风电场的实测故障数据,系统综述了热带海洋环境下风电设备传动系统失效机理研究进展。综述阐明的理论创新点包括:明确场域划分规范,固定式风电为四场耦合,浮式风电为五场耦合,揭示特定区域耦合强度的本土化特征;提出构建"环境场-失效模式-核心机理"多学科交叉分析框架,阐释四大核心部件失效本质;提出研究适配热带海洋环境的四场/五场耦合寿命预测模型。同时梳理当前研究短板,提出未来理论突破方向,以构建完整失效理论体系,为热带海洋风电规模化开发提供理论支撑与工程参考。

关键词:热带海洋环境;风电设备;传动系统;失效机理;多场耦合
中图分类号:TH17
DOI:10.3969/j.issn.1004-132X.2026.10.016 **开放科学(资源服务)标识码(OSID)**:

Research Status and Prospects on Failure Mechanisms of Wind Turbine Transmission Systems in Tropical Offshore Environments

LIU Shihao[1,2*] QIU Na[1,2] LIN Mao[1]
1.School of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou, 570228
2.State Key Laboratory of Tropical Marine Engineering Materials and Materials Evaluation, Haikou, 570228

Abstract: Tropical offshore wind power has become a core field in the global renewable energy strategy. However, the extreme environmental conditions of high salt spray, high humidity, high temperature, strong typhoons, and intense ultraviolet radiation significantly increase the failure probability of wind turbine transmission systems by more than 35% compared with onshore environments, while reducing the service life of key components by nearly 50%. This has become a critical bottleneck restricting large-scale engineering deployment. Based on international and domestic literature, authoritative industry reports, and measured failure data from tropical offshore wind farms, the research progress on the failure mechanism of wind turbine transmission systems under tropical offshore environments was systematically reviewed herein. The theoretical innovations clarified in this review were summarized. First, the environmental field classification was clarified: fixed offshore wind turbines were characterized by four-field coupling, whereas floating offshore wind turbines involve five-field coupling, revealing the localized characteristics of coupling intensity in specific regions. Second, a multidisciplinary analytical framework of "environmental field-failure mode-core mechanism" was proposed to elucidate the fundamental failure mechanism of four key transmission components. Third, a life prediction model based on four-field/five-field coupling adapted to tropical offshore environments was proposed. In addition, current research gaps were summarized and future theoretical breakthrough directions were proposed, aiming to establish a comprehensive failure theory system and provide theoretical support and engineering guidance for the large-scale development of tropical offshore wind power.

Key words: tropical offshore environments; wind turbine; transmission system; failure mechanism; multi-field coupling

0 引言

全球能源转型进入加速期,风能作为清洁、可再生的优质能源,已成为各国能源结构优化的核心选择[1]。热带海洋海域(南北纬23.5°之间)因具备风速稳定(年平均风速6~9 m/s)、发电小时数长(年有效发电小时数2800 h以上)、资源储量大(全球热带海洋风能资源总量约占海上风能总储量的62%)等显著优势,成为海上风电开发的重点区域。我国南海及华南沿海热带海域风能密度

收稿日期:2025-12-26
基金项目:国家自然科学基金联合基金重点项目(U25A20299)

达320～400 W/m²，规划装机容量超5000万千瓦，占全国海上风电规划总容量的28%，其中南海海域规划装机容量占比超70%（约3500万千瓦），涵盖文昌、徐闻、防城港等12个重点风电场，对保障国家能源安全、推动“双碳”目标实现具有不可替代的战略意义[2-3]。

然而，热带海洋极端环境的“多场耦合”特性使风电传动系统面临严峻的可靠性挑战。传动系统作为风电设备的“心脏”，承担着将风能转化为电能的核心功能，其失效不仅影响发电效率，更造成巨额经济损失。固定式机组核心部件（主轴、齿轮箱、轴承）的平均寿命仅为5.8～7.2年，浮式机组核心部件寿命更短，仅5.0～6.0年，远低于设计寿命（20年）[4-5]。近年来，我国南海多个风电场相继出现严重失效案例，充分暴露了现有传动系统设计理论与热带海洋环境的适配性缺口，凸显了开展失效机理研究的迫切性与必要性[6]。

国际上对海洋风电传动系统失效的研究起步较早，重点集中在温带海洋环境（如欧洲北海、美国东海岸），近年来逐渐向热带海洋区域延伸。在环境场特性研究方面，澳大利亚、美国、挪威等的研究团队针对东南亚、加勒比海等热带海域，开展了盐雾、温度、湿度等环境参数的长期监测，建立了区域性的环境参数数据库，但未充分考虑热带海洋特有的强台风、强紫外及高盐雾叠加效应[7-8]。

近年来，随着南海风电开发的推进，我国对热带海洋风电传动系统失效的研究成果显著增多[9]。在环境场本土化特征研究方面，国内团队针对南海海域开展了系统的环境参数监测，明确了场域划分规范，揭示了南海高盐雾、强台风、强紫外、大温差、高波高的独特特征；在失效机理研究方面，初步形成了多场耦合、多尺度分析、本土化适配的研究特色，基于断裂力学、摩擦学等理论，结合海南滨海风电设备的运维实践，探索核心部件的失效演化过程[10-11]。

针对国内外研究现状，本文进行从理论基础（明确断裂力学、摩擦学、多场耦合理论等基础方法）→环境场特征（热带海洋下风电设备传动系统耦合模型，量化参数强度，揭示多场协同致劣机制）→失效模式（分析风电传动系统典型失效形式，拆解失效演化链条）→核心机理→研究不足与展望的递进式综述。

1　热带海洋环境场多参数耦合研究现状

1.1　核心环境场参数的理论对比

热带海洋环境对风电设备传动系统的作用本质是环境场与系统场的相互作用，根据应用场景分为两类场域组合：①固定式风电（四场耦合），即力学场（台风载荷，空气动力学主导）、化学场（盐雾、湿度）、温度场（高温、温差）、辐射场（紫外）；②浮式风电（五场耦合），即在四场基础上纳入波浪场（波浪载荷、平台倾角，流体动力学主导）[12-14]。各场强度与分布特征直接决定部件的损伤程度与失效形式，基于场论分析，南海与国际热带海域的环境场参数存在显著差异。

1）南海Cl^-富集的化学场。南海浪溅区Cl^-浓度显著高于东南亚与加勒比海海域，核心成因在于南海北部海域受北部湾环流与南海暖流的交汇影响，海域封闭性强，洋流交换速率低，导致Cl^-在风电设备传动系统的主轴密封间隙、法兰过渡圆角等部位形成局部富集。根据电化学反应理论，Cl^-浓度升高会显著降低金属氧化膜的击穿电位，加速氧化反应速率，使南海环境下42CrMo钢的腐蚀电流密度较东南亚海域高40%[15-16]。为直观呈现Cl^-浓度对腐蚀速率的影响，相关学者基于南海环境参数开展加速腐蚀试验，研究Cl^-浓度与42CrMo钢腐蚀速率的关系[17-19]，试验结果表明，当Cl^-浓度超过100 mg/m³时（即南海典型浓度范围），腐蚀速率呈指数增长，印证了南海环境下Cl^-浓度是化学场致劣的主导参数。

2）南海台风非平稳力学场。南海是全球台风活动最频繁的海域之一，年均台风登陆次数多，强台风占比高，且台风路径受多重因素影响呈现显著的非平稳特征，导致载荷幅值与方向频繁变化，给风电设备传动系统带来剧烈的动态冲击[20-21]。根据随机振动理论，非平稳载荷下台风风速随时间变化，在台风登陆时段，主峰易与主轴固有频率重叠，引发共振效应，使主轴动应力幅值较平稳载荷显著增加[22]。台风“摩羯”登陆海南文昌风电场时的非平稳载荷时风速分布清晰呈现了登陆前（约0～250 s）、登陆时（约250～500 s）、登陆后（约500～600 s）三个阶段的风速变化特征，登陆时段的风速峰值显著升高，且风速变化分布范围大，充分验证了南海台风载荷的非平稳性特征。

3）南海辐射场与温度场。南海年紫外辐射量及UV-B波段占比均高于国际热带海域，连续的强紫外辐射可直接打破高分子材料的化学键，引发分子链断裂与降解，加速密封件、润滑油等材料的老化。温度场方面，南海夏季风电设备机舱最高温、冬季最低温及昼夜温差均显著高于国际海域，根据热应力理论，昼夜大温差导致部件热应力

累积，加速疲劳裂纹萌生，高温环境则加速润滑脂氧化碳化，丧失承载能力。此外，高湿度为电化学反应提供充足的湿润环境，它与盐雾协同作用加剧了金属腐蚀。

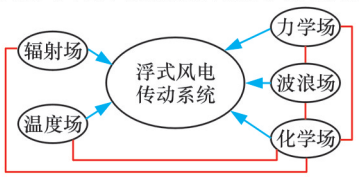
4）南海浮式风电设备的波浪场。浮式风电设备传动系统额外承受独立的波浪场作用，形成“力学场-波浪场-化学场”的三参数耦合载荷[23]。南海波浪场参数显著高于国际热带海域，对传动系统的影响体现在两方面：一是波浪载荷与台风载荷的叠加效应，增大了主轴附加弯矩；二是浮式平台的横摇与纵摇运动，导致传动系统承受偏载，使轴承接触应力分布不均，加速了局部磨损与疲劳失效。

1.2 多参数耦合致劣理论机制

热带海洋环境传动系统的损伤是多场协同耦合的结果，根据场域组合分为两类耦合体系：①固定式风电（四场耦合），即核心效应为化学-温度场耦合、力学-化学场耦合、辐射-化学场耦合；②浮式风电（五场耦合），即在四场耦合基础上新增力学-波浪场耦合、波浪-化学场耦合[24]。图1所示分别为南海固定式风电四场耦合和南海浮式风电五场耦合（新增波浪场），箭头表示场间协同作用方向，红色标注南海核心耦合效应。化学场（高Cl^-）破坏材料表面膜，温度场（大温差）加速反应速率，力学场（强台风）放大应力集中，辐射场（强紫外）劣化高分子材料，波浪场（高波高）增加偏载与附加弯矩，多场协同作用加剧南海风电传动系统失效。



(a) 固定式风电传动系统的四场耦合载荷作用



(b) 浮式风电传动系统的五场耦合载荷作用

图1 南海风电传动系统的多场耦合载荷作用

Fig.1 Multi-field coupling load of wind turbine transmission system in South China Sea

1）高盐雾-高温的化学-温度场耦合。该效应是四场/五场耦合的共同核心，理论本质是温度场对化学场电化学反应速率的催化作用，形成“Cl^-破坏氧化膜→高湿度维持电化学反应→高温加速反应”的恶性循环[25]。根据阿伦尼乌斯方程，反应速率常数与温度成指数关系，南海高温环境显著降低金属腐蚀反应活化能，提高反应速率；同时，高温促进H^+还原生成H_2，H原子渗透至金属内部引发氢脆，导致材料韧性下降。

2）台风-高盐雾的力学-化学场耦合。该场耦合核心是“腐蚀坑应力集中＋台风载荷叠加”的协同放大。根据断裂力学理论，腐蚀坑可视为表面微裂纹，其应力集中系数与坑深、坑宽比值成正相关。南海环境下，腐蚀坑深度大、台风载荷波动剧烈，使局部应力易超过材料屈服极限，加速微裂纹萌生与扩展。通过多尺度仿真，可从宏观、介观、微观层面解析该耦合机制，明确应力分布、离子扩散及原子相互作用规律。

3）强紫外-高盐雾的辐射-化学场耦合。该效应主要针对密封件、润滑油等高分子材料，理论本质是“紫外致分子链断裂＋盐雾加速性能衰减”的协同作用[26-27]。南海强紫外使高分子材料分子链断裂，生成自由基；盐雾中的离子渗透至材料内部，与自由基反应形成极性化合物，降低材料韧性与密封性能；对润滑油而言，紫外辐射加速基础油氧化，盐雾与抗磨添加剂反应，导致添加剂失效、抗磨性能下降。

4）台风-高波高的力学-波浪场耦合。该效应是浮式风电五场耦合的特有核心，理论本质是“台风空气动力载荷与波浪流体动力载荷的非线性叠加”。南海台风强度高、波高大，叠加效应更显著，使主轴应力谱呈现高频波动叠加低频起伏的特征，最大动应力较固定式机组增加，同时平台横摇使轴承接触应力分布不均，加速局部损伤[28]。

1.3 南海四场/五场多参数耦合模型

多参数耦合定量模型是传动系统寿命预测的核心工具，国内外基于Miner线性累积损伤理论、断裂力学Paris公式等建立了各类模型[29]，但在参数覆盖、场域划分及南海适配性上存在显著差异。

国内研究团队针对南海本土化特征，分别建立固定式四场耦合模型与浮式五场耦合模型。四场耦合模型通过多组主轴失效数据拟合，引入紫外辐射参数，修正台风应力参数，建立场域间交互项，预测误差＜9.5%；五场耦合模型在四场模型基础上新增波浪场参数，量化波高与倾角的贡献权重，引入台风-波浪交互项，适配浮式偏载特征，预测误差为10%～12%。

南海四场耦合模型预测值与实测值对比结果直观呈现模型的高精度特性，预测值与实测值的平均误差为6.8%，最大误差为9.2%。

国外模型因试验环境与南海差异，存在场域划分模糊、参数覆盖不全的问题，与南海环境适配性差，缺乏长期户外暴露验证，长期寿命预测的理论可靠性需特别考虑南海特殊环境因素的影响。

1.4　南海浮式风电五场耦合理论的瓶颈

浮式风电五场耦合理论的核心空白集中在波浪场与其他场的耦合机制量化，具体包括：波浪场与其他场的耦合系数缺失，难以精准计算波浪场独立贡献权重；波浪-倾角-接触应力关联模型空白，难以定量描述倾角对轴承接触应力分布的影响[30]；五场耦合时频特征不明，难以建立精准的载荷输入模型；多材料适配性不足，现有模型对新型轻量化材料的适用性未验证。南海浮式风电五场耦合理论瓶颈与数据需求如表1所示。

表1　南海浮式风电五场耦合理论瓶颈与数据需求

Tab.1　Bottlenecks and data demands of five-field coupling theory of floating wind turbine in South China Sea

理论方向	现有研究水平	理论瓶颈	核心难点	数据需求
力学-波浪耦合载荷建模	独立场载荷模型，叠加仿真误差15%	台风-波浪非平稳耦合时频建模	高风速(60 m/s)与高波高(4 m)非线性叠加	台风-波浪同步实测(≥3年，12级以上台风)
波浪-化学场耦合系数	定性分析波浪加速盐雾渗透	波浪对盐雾分布的系数量化	高波高(4 m)下盐雾扩散仿真	不同海况盐雾浓度分布(≥2年)
倾角-接触应力关联	仿真倾角15°应力增25%，无试验	倾角与轴承应力分布定量关系	偏载下轴承接触力学非线性(高盐雾致腐蚀)	不同倾角轴承应力实测(≥10组工况)
浮式润滑失效预测	固定式模型修正，误差20%	波浪-倾角-润滑耦合模型	倾角15°润滑油分布不均＋波浪载荷协同	不同“倾角＋波高”润滑性能试验(≥15组)

2　传动系统失效模式及其成因研究现状

热带海洋环境下，风电设备传动系统的失效呈现多部件连锁、多机制叠加的特征，核心失效部件包括主轴、齿轮箱、轴承及润滑密封系统[31-32]。基于南海地区12个风电场的实测故障数据，固定式与浮式风电的失效模式基本一致，但浮式风电因波浪场作用，失效风险更高，平均寿命缩短10%～15%，各部件的失效特征如表2所示。

表2　南海风电传动系统四大部件失效特征

Tab.2　Failure characteristics of four components of South China Sea wind turbine transmission system

部件类型	核心失效机制	主导环境场	平均寿命/h	故障占比/%	关键失效参数
主轴系统	腐蚀-疲劳耦合	力学-化学-温度(浮式＋波浪)	固定式6.5万；浮式5.8万	35	多裂纹源：固定式2～5个、浮式3～6个；扩展速率：2.3～2.8/2.5～3.0 nm/cycle；临界裂纹尺寸：2.2/2.0 mm
齿轮箱	润滑失效→齿面损伤→轴承失效	温度-化学-力学(浮式＋波浪)	固定式5.8万；浮式5.0万	45	胶合占比：固定式65%、浮式70%；点蚀深度：0.35/0.4 mm；润滑油酸值：0.32/0.35 mg/g(以KOH计)
轴承系统	腐蚀磨损＋高温卡死＋疲劳剥落	化学-温度-力学(浮式＋波浪)	固定式4.2万；浮式3.6万	15	年磨损：0.18/0.21 mm；夏季卡死率：15%±2%/18%±2%；接触应力超设计值：29%/34%
润滑密封系统	密封失效→润滑污染	辐射-化学-湿度(浮式＋波浪)	固定式3.5万；浮式3.0万	5	金属磨粒：(180±15)/(200±15) ppm；渗漏量：(6±1)/(7±1) L/天；密封件寿命：8～10/7～9个月

2.1　主轴系统腐蚀-疲劳耦合失效

风电设备传动系统主轴失效本质是多场耦合下的腐蚀-疲劳协同失效，固定式风电设备传动系统主轴失效为力学-化学-温度三场协同，浮式风电设备传动系统主轴失效为力学-波浪-化学-温度四场协同。浮式风电设备主轴失效分为5个阶段：①氧化膜破坏与Cl^-吸附(0～72 h)；②腐蚀坑形成(72 h～1年)；③ 微裂纹萌生(1～2年)；④多裂纹扩展(2～5年)；⑤瞬时断裂(5～5.8年)。

1)化学场主导的腐蚀坑形成。根据电化学反应理论，南海高盐雾、高湿度环境下，Cl^-优先吸附于主轴应力集中区域，破坏表面氧化膜，局部腐蚀电池。阳极反应产生的Fe^{2+}与阴极反应生成的OH^-结合形成铁锈，Cl^-持续侵入与富集使氧化膜无法自愈，金属表面逐渐形成腐蚀坑。南海环境下的腐蚀坑多为不规则形，深度与宽度比大，应力集中效应显著，为后续裂纹萌生创造条件。

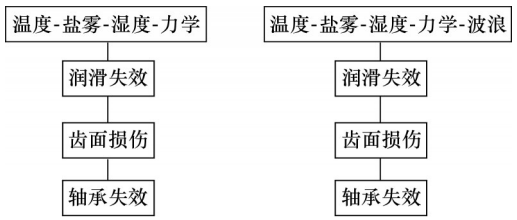
2)多场协同的裂纹萌生与扩展机制。根据断裂力学理论，腐蚀坑尖端的应力集中使局部应力达到材料屈服极限，在交变载荷作用下产生塑性变形并萌生微裂纹。固定式风电中，台风非平稳载荷缩短裂纹萌生时间；浮式风电中，台风-波浪耦合载荷进一步加速裂纹萌生。裂纹扩展阶段遵循Paris公式。南海环境下的协同效应使扩展速率显著升高：化学场中Cl^-降低材料断裂韧性；力学场中台风非平稳载荷增大应力强度因子范围；浮式环境下波浪载荷扩大应力强度因子范围，偏载导致裂纹扩展路径偏向受力一侧；多裂纹源协同效应使扩展路径不规则，加速整体失效[33]。

3)临界裂纹尺寸的理论差异。根据Griffith理论，裂纹临界尺寸与材料断裂韧性、外加应力相关。南海环境下，腐蚀作用降低材料断裂韧性，交变载荷增加外加应力，共同导致主轴的临界裂纹尺寸较小，固定式为2.2 mm，浮式为2.0 mm，在同等裂纹扩展阶段更易发生瞬时断裂，浮式风电因波浪场的额外作用，失效风险进一步升高。

2.2　齿轮箱摩擦与润滑多因素失效

齿轮箱是传动系统中失效概率最高的部件

(故障占比45%),其失效呈现润滑失效→齿面损伤→轴承失效的连锁特征,固定式为温度-盐雾-湿度-力学四场协同,浮式为温度-盐雾-湿度-力学-波浪五场协同,如图2所示。



(a) 固定式风电　　(b) 浮式风电

图2　失效的连锁特征

Fig.2　Interlocking characteristics of failure

1)多场耦合的润滑失效。根据润滑理论,润滑油的润滑性能取决于黏度、油膜强度与抗污染能力。南海环境下多场耦合导致三者同步劣化:高温使润滑油黏度显著下降,油膜厚度减小,浮式风电中齿轮箱倾斜加剧润滑油分布不均;盐雾侵入形成磨粒,破坏油膜连续性;高湿度使油液含水量增加,与抗磨添加剂反应导致添加剂浓度下降,抗磨性能丧失。

2)油膜破裂与载荷叠加的齿面损伤。根据摩擦学理论,油膜破裂导致齿面金属直接接触,叠加交变载荷作用,引发齿面胶合与点蚀。南海台风载荷使齿轮啮合接触压力超过油膜承载极限,摩擦热导致齿面金属软化黏着,形成胶合损伤;盐雾磨粒在齿面接触区域产生局部应力集中,使接触应力超过材料接触疲劳极限,在交变载荷作用下产生疲劳裂纹,扩展至表面后形成点蚀坑。

3)齿轮箱轴承温度-应力叠加失效。齿轮箱轴承的失效形式主要为高温卡死与疲劳剥落,其理论成因与温度场、力学场(浮式+波浪场)的耦合作用密切相关。高温使润滑脂氧化碳化,润滑能力丧失,同时导致轴承配合间隙减小,摩擦力超过材料屈服极限引发卡死;昼夜温差使轴承游隙变化,基于接触力学理论,游隙减小导致轴承接触应力增大,超过设计值,长期交变应力作用下产生疲劳裂纹,扩展后形成剥落坑[34]。

2.3　轴承系统材料-接触力学耦合失效

风电设备轴承系统(偏航轴承、主轴轴承、变桨轴承)是传动系统的核心支撑部件,其失效体现在接触应力超限+材料性能劣化的协同效应,固定式为化学-温度-力学三场协同,浮式为化学-温度-力学-波浪四场协同[35]。

1)偏航轴承腐蚀磨损与浮式偏载影响。偏航轴承受轴向载荷与倾覆力矩作用,失效形式以腐蚀磨损为主。南海高盐雾环境使滚动体与套圈表面的磷化膜发生腐蚀破坏,形成腐蚀坑;偏航运动产生的相对滑动引发黏着磨损,腐蚀与磨损协同作用加速轴承失效。浮式机组的偏载效应进一步加剧失效,平台横摇使载荷集中在轴承一侧,最大接触应力超过设计值,磨损量增加,寿命缩短。

2)主轴轴承高温与温度波动作用。风电设备传动系统主轴轴承失效以高温卡死与疲劳剥落为主。南海高温使润滑脂碳化,承载能力丧失,热膨胀导致轴承配合间隙减小,引发卡死;温度波动使轴承游隙变化,接触应力超过接触疲劳极限,长期作用下亚表面产生疲劳裂纹,扩展后形成剥落坑。

3)变桨轴承辐射-化学-波浪耦合。风电设备变桨轴承失效以密封失效为主,核心是辐射-化学场耦合(固定式)与辐射-化学-波浪场耦合(浮式)的协同作用。南海强紫外辐射使密封件分子链断裂,弹性保持率下降,界面黏附力降低;盐雾侵入腐蚀密封面,进一步破坏密封性;浮式环境下平台晃动使密封件承受周期性拉伸-压缩变形,加速密封唇口龟裂[36]。密封失效后,盐雾、水分与灰尘侵入轴承内部,引发腐蚀磨损,加速轴承整体失效。

2.4　润滑与密封系统失效理论

润滑与密封系统是传动系统的防护屏障,其失效呈现密封失效→润滑污染→部件磨损的连锁特征,固定式为辐射-化学-湿度三场协同,浮式为辐射-化学-湿度-波浪四场协同。

1)密封系统多场耦合的界面劣化。密封系统失效的核心是密封界面黏附力下降。具体机制为:强紫外使密封材料分子链断裂,表面能降低,界面黏附力下降;盐雾腐蚀密封面形成凹坑,破坏界面连续性,密封间隙增大;浮式环境下平台晃动导致密封件与密封面接触压力周期性变化,加速界面磨损,进一步降低黏附力。

2)化学场主导的润滑界面损伤。基于污染扩散理论,南海盐雾侵入形成盐雾-水汽-金属磨粒的复合污染体系,对润滑油造成多重损伤。盐雾中的磨粒划伤齿轮、轴承表面,破坏表面光洁度;水汽使油液含水量增加,与润滑油基础油反应生成有机酸,腐蚀金属部件表面;金属磨粒与抗磨添加剂、抗氧化添加剂反应,导致添加剂失效,润滑油性能全面劣化。浮式环境下平台晃动使磨粒在油液中分布更均匀,划伤概率增加。

3　核心失效机理的理论进展与挑战

3.1　腐蚀-疲劳耦合机理

腐蚀-疲劳耦合是金属部件(主轴、轴承、齿轮)失效的核心机理,当前研究在多尺度理论构建

与参数贡献量化方面取得显著进展，初步形成宏观-介观-微观的理论分析体系。

1）多尺度理论框架的构建。国内团队通过多尺度方法的整合，揭示了腐蚀-疲劳耦合的本质规律。宏观尺度建立主轴-齿轮箱一体化模型，模拟应力分布与裂纹扩展路径；介观尺度采用格子玻尔兹曼方法，模拟Cl^-在金属内部的扩散过程，计算扩散系数；微观尺度通过分子动力学计算，分析Cl^-与Fe原子的相互作用，揭示原子溶解与晶格畸变机制。三者结合形成多尺度理论，实现环境参数→微观反应→宏观失效的跨尺度关联，为耦合机理的定量分析提供支撑。

2）参数贡献权重的量化。国内研究人员基于南海风电场实测数据，通过多元线性回归分析与敏感性测试，初步量化了四场/五场耦合下各参数的贡献权重：固定式风电中盐雾35%、台风30%、温度20%、紫外15%；浮式风电中盐雾35%、台风30%、温度10%～15%、紫外10%、波浪场10%～15%。该量化结果明确了核心致劣参数，建立了参数敏感性规律，完善了耦合模型交互项，提高了预测精度。

3.2　多场耦合润滑失效机理

传统润滑理论多基于单一温度场或载荷场，无法适用于热带海洋多场耦合环境，国内外当前最新研究基于多场耦合理论，建立了四场/五场耦合润滑模型，理论体系日趋完善[37]。

当前模型以雷诺方程为基础，引入各场参数的影响项，涵盖温度场、盐雾场、湿度场、载荷场及浮式专属的波浪场，通过仿真与试验验证，四场耦合模型对油膜厚度的预测误差＜3%（固定式），五场耦合模型预测误差＜5%（浮式），波浪场对润滑性能有额外影响，浮式风电在台风-波浪耦合载荷突变时段，油膜厚度降幅更大。

3.3　非平稳载荷下冲击-振动耦合机理

南海台风的非平稳性与浮式风电的波浪载荷叠加是冲击-振动失效的核心，当前最新研究基于非平稳载荷理论，建立了台风-波浪耦合载荷时频分析模型与冲击-振动耦合理论。

1）台风-波浪耦合载荷的理论建模。国内团队将小波变换与神经网络相结合，建立非平稳耦合载荷的时频分析模型：采用Morlet小波变换提取不同频率段的时频特征，基于长短期记忆网络（LSTM）预测未来耦合载荷时频分布，结合实测数据与预测模型生成南海台风-波浪耦合非平稳载荷谱，为冲击-振动耦合分析提供精准输入。

2）冲击-振动耦合的理论分析。基于随机振动理论，国内团队建立了台风-波浪耦合载荷→主轴共振→齿轮箱载荷放大→轴承损伤的耦合理论链条。耦合载荷频率与主轴固有频率重叠时引发共振，振动幅值增大；主轴振动传递至齿轮箱，使齿轮冲击力增大；振动幅值增大使轴承接触应力波动范围扩大，疲劳损伤速率提高，寿命缩短。针对浮式机组，国内团队提出磁流变阻尼器动态控制方案，进一步完善浮式冲击-振动理论。

3.4　新型材料失效机理的理论挑战

碳纤维复合材料（CFRP）、陶瓷基复合材料（CMC）因轻量化、高耐蚀性等优势，成为热带海洋风电传动系统的潜在替代材料，但现有理论难以解释其在南海多场耦合环境下的失效规律，核心挑战集中在界面失效、疲劳理论与微观机制三方面。

1）界面失效理论缺失。CFRP的失效多源于纤维-树脂界面剥离，南海强紫外与高盐雾的协同作用加剧该问题，但现有理论缺乏紫外-盐雾-界面结合力的定量关系，盐雾离子渗透路径不明，浮式环境下波浪振动对离子渗透的影响缺乏试验与理论支撑[38-39]。

2）疲劳理论不完善。CMC在高温-载荷-盐雾耦合下的疲劳失效机制与金属差异显著，现有金属疲劳理论无法适配，多场耦合效应未纳入疲劳寿命模型，裂纹扩展规律适配性差，浮式偏载对裂纹扩展的影响未知。

3）微观机制不明确。南海高盐雾与强紫外使CMC的孔隙率增加，但微观层面的失效机制未阐明，离子与陶瓷相的相互作用未被证实，孔隙形成机制不明，紫外与盐雾的协同微观效应缺乏原子级理论解释[40]。CFRP在南海固定式/浮式环境下的界面失效结果呈现了紫外-盐雾-高温耦合的协同破坏，但其微观层面失效机理尚不清楚。

4　研究不足与未来理论突破方向

4.1　现存理论短板

1）多场耦合理论不完善。现有多场耦合理论存在场域定义模糊＋耦合系数缺失＋多材料适配不足的问题：部分研究仍将波浪场归入力学场，未明确四场/五场耦合的适用边界；波浪场与其他场的耦合系数尚未量化，难以精准计算波浪场的独立贡献；现有模型仅针对42CrMo钢，对新型复合材料的适配性未被验证；长期数据支撑不足，浮式五场耦合模型的试验样本量有限[41-43]。

2）长效防护理论滞后。防护技术寿命与风电设备20年设计寿命不匹配，理论层面的核心短板包括：防护涂层界面理论缺失，涂层-基体热膨

胀失配应力定量计算模型缺失；自修复理论不完善，环境参数-微胶囊破裂速率-修复效率的定量理论未建立；多参数协同防护理论空白，缺乏盐雾-台风-紫外-波浪协同防护的理论。

3）浮式风电设备设计理论缺乏。浮式风电设备设计理论研究滞后于工程需求，核心缺口体现在：载荷耦合定量理论不足，台风-波浪-倾角三参数耦合的完整数学模型未建立；轻量化设计理论缺乏，新型材料主轴、齿轮箱的轻量化设计多基于经验；动态响应控制不足，平台运动参数-动态载荷幅值的理论关系未明确。

4）智能监测理论不足。智能监测是实现预测性维护的关键，现有理论存在以下短板：多源数据融合理论不完善，难以建立振动-油液-环境-倾角多维度数据的融合模型；早期故障识别理论缺失，对微裂纹、油液微污染等早期故障难以实现早期识别；监测系统场域适配性不足，缺乏针对五场耦合环境的信号滤波与特征提取理论。

4.2 未来理论突破方向

1）四场/五场耦合理论体系的完善。针对多场耦合理论的短板，未来需从三方面突破：基于场论明确四场/五场耦合的适用场景与边界条件，通过长期监测量化耦合系数，建立完整的耦合系数矩阵；开展新型复合材料长期户外暴露试验，结合机器学习建立普适性失效预测模型；搭建南海户外暴露试验站，对多种材料开展10年以上暴露试验，验证耦合模型的长期预测精度[44]。

2）长效防护理论的创新与发展。围绕防护技术寿命短的问题，需从界面理论与自修复机制两方面突破：研究复合涂层与基体的界面结合机制，优化界面成分，建立界面成分-结合强度-耐蚀性的理论模型；研发温度-盐雾-振动响应型微胶囊自修复剂，建立环境参数-微胶囊破裂速率-修复效率的定量理论；研究抗紫外改性与耐盐雾涂层的协同作用机制，建立协同防护效率计算模型。

3）浮式风电传动系统理论的突破。针对浮式风电设备传动系统设计理论空白，需重点开展三方面研究：基于船舶动力学与海洋工程理论，开展多海况耦合载荷试验，建立倾角与主轴附加弯矩的精准关系；基于复合材料力学与多目标优化理论，建立新型材料主轴的纤维铺层优化模型，研发齿轮箱一体化设计理论；基于减振装置的工作原理，建立平台运动参数-阻尼系数-振动抑制效果的理论模型，结合智能算法实现振动的实时抑制。综合以上分析，浮式风电五场耦合理论空白与未来突破方向如表3所示。

表3 浮式风电五场耦合理论空白与未来突破方向

Tab. 3 Blank and future breakthrough direction of five-field coupling theory of floating wind power equipment

理论空白类型	核心问题	突破方向	关键技术手段	预期目标
台风-波浪-倾角耦合建模	三参数耦合的定量关系未建立	五场耦合数学建模＋试验验证	COMSOL Multiphysics仿真＋MTS电液伺服加载试验	载荷预测误差＜8%
新型材料失效机理	CFRP/CMC的多场耦合失效规律不明	新型材料长期暴露试验＋多尺度仿真	10年户外暴露试验＋分子动力学仿真	建立材料-环境-寿命普适模型
长效防护界面理论	涂层界面开裂机制未阐明	涂层-基体界面应力计算＋协同防护设计	界面力学仿真＋涂层优化试验	防护层寿命超15年
智能监测多源融合	多维度数据关联理论缺失	CNN-LSTM-GRU融合算法＋特征工程	风电场多源数据采集＋算法训练	早期故障预警滞后＜10 h

4）智能监测理论的优化与完善。为提高监测系统的协同性与早期识别能力，需从三方面优化理论：基于深度学习开发融合算法，建立多维度数据的融合模型；结合断裂力学、摩擦学与机器学习，建立微故障特征-失效演化的定量关联模型；基于数字孪生技术，建立南海风电设备传动系统的虚实映射模型，结合环境预报建立预测性维护＋应急调度的智能运维理论[45]。图3为风电设备传动系统智能监测多源数据融合流程图，直观呈现了数据采集、特征提取、融合建模与故障预警的完整逻辑。

5 南海风电传动系统失效理论体系展望

基于前文对南海热带海洋环境场特征、传动系统典型失效模式及核心作用机理的系统解析[46]，针对现有研究碎片化、单维度、工程适配性不足的局限，提出构建环境-载荷-失效-防控四维耦合的完整失效理论体系，将固定式四场耦合、浮式五场耦合的致劣规律纳入统一框架，明确热带海洋工况下传动系统失效的演化逻辑与防控核心，实现环境输入-载荷响应-失效输出-防控反馈的闭环分析，整体框架如图4所示，为南海风电传动系统的可靠性设计、故障预警及运维优化提供系统性理论支撑。

5.1 维度一：环境-载荷耦合诱发层

环境-载荷耦合诱发层是失效发生的初始诱因，核心是量化南海热带海洋多环境场与传动系统运行载荷的耦合作用规律，明确环境参数→载荷特性的转化关系，为后续失效分析提供精准载荷边界条件。本层针对固定式、浮式风电分别构

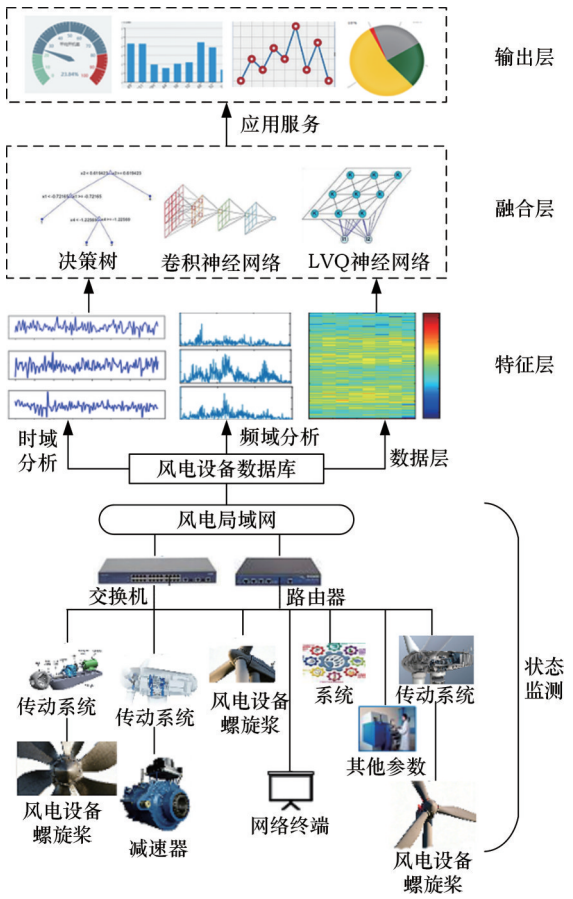


图3　智能监测多源数据融合流程

Fig.3　Intelligent monitoring multi-source data fusion process

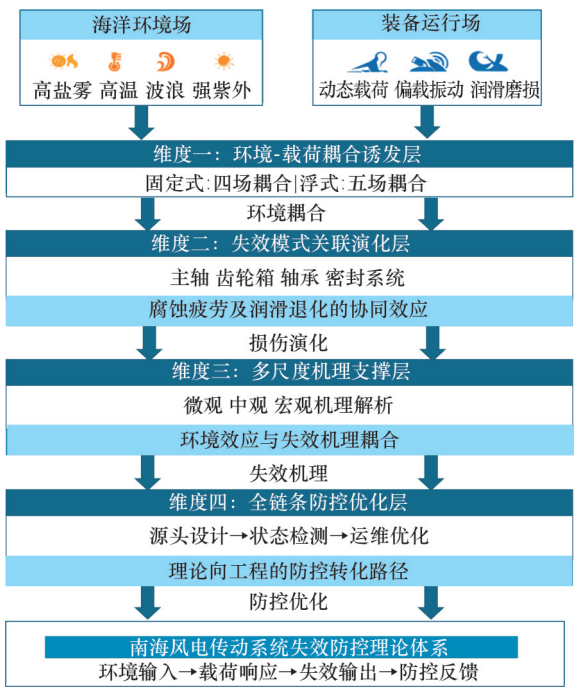


图4　失效理论体系整体框架

Fig.4　Integrated framework of failure theory system

建耦合模型，核心耦合关系如下。

1）固定式风电（四场耦合）：核心为化学-力学场、温度-力学场、辐射-化学场三重耦合。其中Cl^-富集（化学场）与台风非平稳载荷（力学场）的耦合为核心致劣因素，贡献率占比高；高温（温度场）通过降低材料疲劳极限放大台风载荷的损伤效应，强紫外（辐射场）通过劣化密封材料加速盐雾侵入，形成环境致劣-载荷放大的恶性循环。

2）浮式风电（五场耦合）：在四场耦合基础上，新增波浪-力学场、波浪-化学场耦合，南海高波高引发的平台横摇使传动系统承受额外偏载，主轴附加弯矩增加，同时波浪拍击加剧盐雾在设备间隙的局部富集，Cl^-局部富集系数提高，进一步加速腐蚀-疲劳耦合失效。

本层通过多元线性回归与敏感性分析来量化各环境参数对载荷的贡献权重，建立环境-载荷耦合量化模型，实现从南海环境参数到传动系统实际载荷的精准预测。

5.2　维度二：失效模式关联演化层

失效模式关联演化层是失效的表观表征，核心是梳理多场耦合载荷作用下，传动系统四大核心部件（主轴、齿轮箱、轴承、润滑密封系统）的失效演化路径与模式交互效应，打破单一部件独立分析的传统思路，明确部件间的失效连锁规律。

南海环境下失效演化遵循初始微损伤→损伤累积→失效爆发→系统连锁失效四阶段规律，且浮式风电因波浪场作用，各阶段演化速率较固定式均会提高。核心演化特征与交互效应如下。

1）单一部件失效演化：主轴为腐蚀坑形成→微裂纹萌生→多裂纹扩展→瞬时断裂；齿轮箱为润滑失效→齿面胶合/点蚀→轴承卡死→齿轮箱失效；轴承为腐蚀磨损→接触应力超限→疲劳剥落/高温卡死；润滑密封系统为密封件老化→盐雾侵入→润滑油污染→全系统润滑失效。

2）部件间失效连锁效应：润滑密封系统失效为核心起始失效点，密封失效导致的盐雾、磨粒侵入同时加速主轴腐蚀、齿轮箱齿面损伤及轴承磨损，形成密封失效→多部件协同劣化→系统整体失效的连锁反应。

本层将明确南海环境下各失效模式的临界判定指标，如主轴临界裂纹尺寸、齿轮箱润滑油酸值临界值等。

5.3　维度三：多尺度机理支撑层

多尺度机理支撑层是失效的本质内核，核心是从微观（材料）-中观（部件）-宏观（系统）三个尺度，解析南海多场耦合载荷下传动系统失效的内在作用机理，实现环境致劣-失效现象的机理溯源，为防控优化提供理论依据。

1）微观尺度（材料层面）：聚焦南海高盐雾、强

紫外下的材料微观损伤规律，如Cl^-对42CrMo钢的电化学腐蚀机理（Cl^-吸附→氧化膜破坏→晶格畸变→腐蚀坑形成）、强紫外对高分子密封材料的分子链断裂机理（紫外光子打破C-C键→自由基生成→材料韧性下降），明确材料性能退化的微观本质。

2）中观尺度（部件层面）：针对主轴、齿轮箱等核心部件，解析耦合载荷下的失效机理，如主轴腐蚀-疲劳耦合机理（腐蚀坑引发应力集中→台风交变载荷加速裂纹扩展）、齿轮箱润滑-摩擦耦合机理（高温导致油膜厚度减小→齿面直接接触→胶合/点蚀形成），量化部件损伤速率与环境载荷的关联关系。

3）宏观尺度（系统层面）：建立传动系统可靠性耦合模型，解析单一部件失效对系统整体的影响规律，如轴承卡死导致的齿轮箱载荷突变、主轴裂纹扩展引发的全传动链振动放大，明确系统失效的临界条件与故障传播路径。

三个尺度通过参数关联、机理衔接形成完整逻辑链：微观材料损伤决定中观部件性能退化速率，中观部件失效决定宏观系统可靠性，实现从原子级作用到系统级失效的全尺度机理解析。

5.4 维度四：全链条防控优化层

全链条防控优化层是体系的最终目标，核心是基于前文环境-载荷耦合规律、失效演化特征及多尺度机理，提出源头设计-过程监测-末端运维的全链条防控优化策略，实现理论体系向工程应用的落地转化，且策略充分适配南海固定式、浮式风电的差异化需求。

1）源头设计优化：针对南海环境特征，优化传动系统材料选型、结构设计及防护设计。主轴、轴承采用耐蚀耐磨合金材料（如超级双相不锈钢），齿轮箱增设防盐雾密封装置，浮式风电主轴增加偏载补偿结构；同时基于环境-载荷耦合模型，优化部件载荷设计阈值。

2）过程状态监测：构建南海专属多源数据融合监测体系，整合振动、油液、环境、倾角4类数据（浮式新增波高、平台姿态数据），通过CNN-LSTM融合算法提取故障特征，实现早期故障识别（如微裂纹、润滑油微污染），预警滞后控制在允许范围内。

3）末端运维优化：制定南海差异化运维策略，固定式风电重点开展盐雾防护（如每6个月对密封件进行检测更换）、台风前载荷调控；浮式风电新增波浪场监测与偏载补偿，每3个月对轴承接触应力进行检测，同时建立南海风电场区域化运维中心，提高故障抢修效率。

6 研究路径与合作机制建议

针对南海热带海洋风电规模化开发的工程实际需求，结合前文构建的失效理论体系与南海本土化致劣规律，从试验平台建设、定制化工程应用、数据共享机制、行业标准制定四大维度提出可落地的研究路径，并建立“产学研用”联动的合作机制，实现理论成果向工程应用的转化，为南海风电传动系统的可靠性提高提供具体实施方案，总体路线如图5所示。

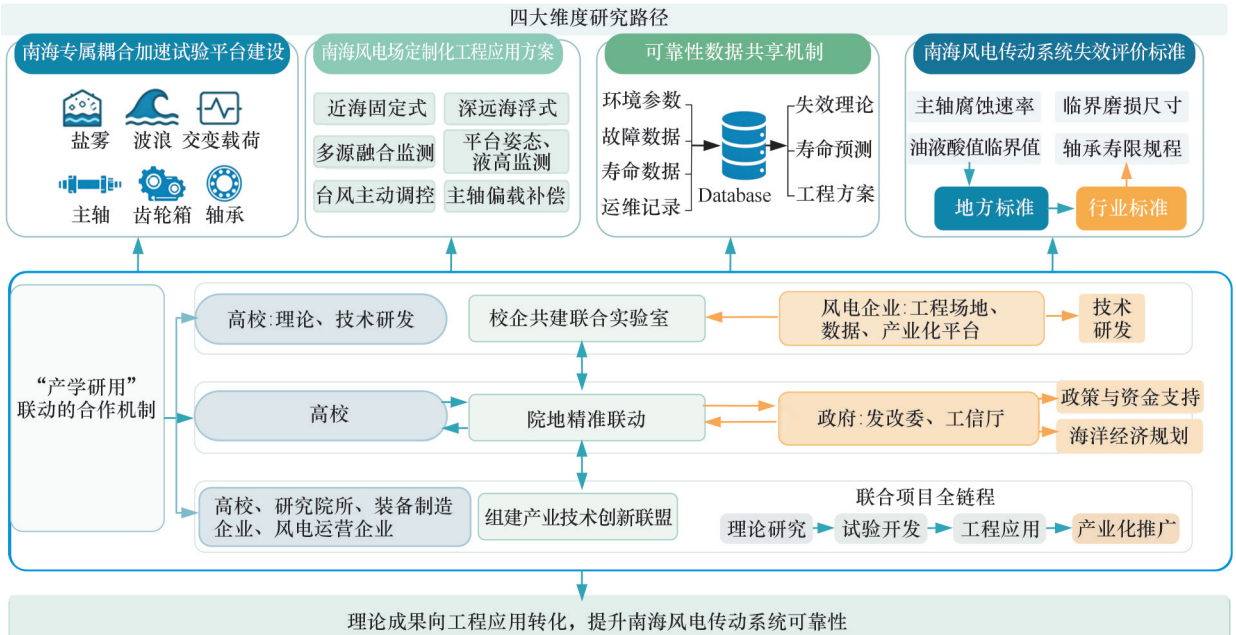


图5 总体实施路线

Fig.5 Overall Implementation Path

6.1　南海风电联合加速试验平台建设

依托海南文昌滨海风电场试验基地、热带沿海优势高校，联合南海风电运营企业，搭建南海热带海洋风电传动系统盐雾-波浪-交变载荷联合加速试验平台。平台精准模拟南海本土化环境参数，同时集成温度、紫外辐射等耦合参数调控模块，实现固定式/浮式风电传动系统核心部件的多场耦合加速试验。试验平台重点开展主轴、齿轮箱、轴承等部件的腐蚀-疲劳耦合、润滑失效等试验，为南海风电传动系统部件的材料选型、结构优化提供直接的试验数据支撑。

6.2　南海风电场定制化工程应用方案

针对南海文昌、徐闻、防城港等12个重点风电场的差异化工况（固定式/浮式、近岸/深远海），制定状态监测＋主动防控可靠性提高方案。对于近岸固定式风电场，重点加装振动、油液、环境多源融合监测传感器，基于失效理论体系的临界失效指标，建立主轴裂纹、齿轮箱胶合等早期故障预警模型，缩短预警滞后时间；台风季前通过风机变桨距系统主动调控载荷，降低台风非平稳载荷对传动系统的冲击损伤。对于深远海浮式风电场，在固定式方案基础上，增设平台姿态、波高监测模块，加装主轴偏载补偿结构，优化轴承接触应力分布，同时每3个月开展一次密封系统专项检测，从源头减少盐雾侵入引发的润滑污染。通过该方案，减少南海风电传动系统故障停机时间，降低单台机组年均维修成本。

6.3　可靠性数据共享机制

由沿南海地区优势高校牵头，联合科研院所、风电装备制造企业和风电运营企业，建立南海风电装备传动系统可靠性数据共享平台。平台明确数据采集核心维度：南海热带海洋环境参数（盐雾、台风、波高、紫外辐射等）、传动系统核心部件故障数据（失效形式、发生时间、运行工况）、部件寿命数据、运维记录等。制定规范化数据采集标准与共享协议，明确成果转化规则，保障各方权益，为失效理论体系完善、寿命预测模型优化、工程方案制定提供海量工程数据支撑。

6.4　南海风电传动系统失效评价标准

依托热带沿海优势高校，联合国家风电设备质量监督检验中心、市场监督管理部门，牵头制定《热带海洋风电传动系统失效评价技术规范》（地方标准→机械工业行业标准）。标准基于本文构建的失效理论体系，明确南海热带海洋环境下风电传动系统四大核心部件的失效评价指标，即主轴腐蚀速率、临界裂纹尺寸、齿轮箱润滑油酸值临界值、轴承年磨损量等；同时规范失效检测方法、评价流程及防护技术要求，填补我国热带海洋风电传动系统失效评价标准的空白，为南海风电设备传动系统的设计、生产、运维提供统一的标准依据。

6.5　产学研用深度融合的合作机制

为保障上述研究路径落地实施，建立“校企合作、院地联动、产学研用一体化”的三级合作机制。一是校企共建联合实验室，高校提供理论研究、技术研发支撑，风电企业提供工程试验场地、实测数据及产业化平台，共同开展传动系统可靠性提高技术研发；二是院地精准联动，高校与国家或地方科技管理部门对接，将南海风电传动系统失效与可靠性研究纳入海洋经济发展规划，争取政策与资金支持；三是组建产业技术创新联盟，整合高校、科研院所、风电设备制造企业、风电场运营企业资源，联合申报国家级、省部级热带海洋风电科研项目，实现理论研究-试验开发-工程应用-产业化推广的全链条贯通，推动失效理论体系成果快速转化为南海风电工程实际生产力。

7　结论

本文从理论基础、环境场特征、失效模式、核心机理、研究不足与未来方向6个维度，系统综述了近年来热带海洋环境下风电传动系统失效机理的研究进展，结合南海本土化特征，得出以下核心结论：

1）环境场理论与场域划分方面。热带海洋风电传动系统的环境场分为两类，固定式为力学场-化学场-温度场-辐射场四场耦合，浮式为力学场-波浪场-化学场-温度场-辐射场五场耦合。南海环境具有高盐雾、强台风、强紫外、大温差、高波高的本土化特征，多场耦合强度较国际热带海域高，Cl^-局部富集、台风非平稳性、波浪-台风耦合是南海独有的致劣因素。

2）失效模式与本土化规律方面。南海风电传动系统四大部件呈现多场叠加致劣化加剧的特征，浮式风电失效风险高于固定式。主轴基于腐蚀-疲劳耦合，多裂纹源与高扩展速率显著；齿轮箱基于润滑失效连锁效应，夏季胶合失效占比高；轴承基于腐蚀磨损与高温卡死，年磨损量大、夏季卡死率高；润滑密封基于连锁失效，润滑油金属磨粒浓度高、密封件寿命短。

3）核心机理与模型创新方面。国内研究形成多尺度理论体系，量化参数贡献权重，建立四场/五场耦合润滑模型与寿命预测模型，理论创新性

与工程适配性较好。

4)理论短板与突破方向方面。当前研究在多场耦合机制量化、长效防护、浮式设计、智能监测等方面存在短板。未来需通过四场/五场耦合建模+数字孪生、环境响应型自修复防护、浮式轻量化设计、多源数据融合监测算法四大核心方向,建立适配南海热带环境的失效与防护理论体系。

本文构建的完整失效理论体系为我国南海风电装备的可靠性设计、防护技术研发与智能运维提供了重要的理论支撑与工程参考,未来随着南海浮式风电场规模化建设与长期监测数据积累,相关理论将进一步完善,为全球热带海洋风电开发提供中国方案。

参考文献:

[1] 刘吉臻,马利飞,王庆华,等. 海上风电支撑我国能源转型发展的思考[J]. 中国工程科学,2021,23(1):149-159.
LIU Jizhen, MA Lifei, WANG Qinghua, et al. Offshore Wind Power Supports China's Energy Transition[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(1): 149-159.

[2] 刘洪波,彭晓宇,张崇,等. 风电参与电力系统调频控制策略综述[J]. 电力自动化设备,2021,41(11):81-92.
LIU Hongbo, PENG Xiaoyu, ZHANG Chong, et al. Overview of Wind Power Participating in Frequency Regulation Control Strategy for Power System[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(11): 81-92.

[3] 林伯强,杨梦琦. 碳中和背景下中国电力系统研究现状、挑战与发展方向[J]. 西安交通大学学报(社会科学版),2022,42(5):1-10.
LIN Boqiang, YANG Mengqi. China's Power System Research in the Context of Carbon Neutrality: Current Status, Challenges, and Development Direction[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University (Social Sciences), 2022, 42(5): 1-10.

[4] CAO Y, MENG Y, ZHANG Z, et al. Life Cycle Environmental Analysis of Offshore Wind Power: a Case Study of the Large-scale Offshore Wind Farm in China[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 196: 114351.

[5] JI L, LI J, SUN L, et al. China's Onshore Wind Energy Potential in the Context of Climate Change[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 203: 114778.

[6] 秦世耀,齐琛,李少林,等. 电压源型构网风电机组研究现状及展望[J]. 中国电机工程学报,2023,43(4):1314-1333.
QIN Shiyao, QI Chen, LI Shaolin, et al. Review of the Voltage-source Grid Forming Wind Turbine[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(4): 1314-1333.

[7] PANDIT R K, ASTOLFI D, DURAZO CARDENAS I. A Review of Predictive Techniques Used to Support Decision Making for Maintenance Operations of Wind Turbines [J]. Energies, 2023, 16(4): 1654.

[8] OLABI A G, WILBERFORCE T, ELSAID K, et al. A Review on Failure Modes of Wind Turbine Components [J]. Energies, 2021, 14(17): 5241.

[9] FAN Q, WANG X, YUAN J, et al. A Review of the Development of Key Technologies for Offshore Wind Power in China[J]. Journal of Marine Science and Engineering, 2022, 10(7): 929.

[10] 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.

[11] 李铮,郭小江,申旭辉,等. 我国海上风电发展关键技术综述[J]. 发电技术,2022,43(2):186-197.
LI Zheng, GUO Xiaojiang, SHEN Xuhui, et al. Summary of Technologies for the Development of Offshore Wind Power Industry in China[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(2): 186-197.

[12] 周恒宇,周建星,温建民,等. 风电轴承失效模式研究进展[J]. 轴承,2023(6):102-114.
ZHOU Hengyu, ZHOU Jianxing, WEN Jianmin, et al. Research Progress on Failure Modes of Wind Turbine Bearings[J]. Bearing, 2023(6): 102-114.

[13] MOURAD A I, ALMOMANI A, AHMAD SHEIKH I, et al. Failure Analysis of Gas and Wind Turbine Blades: a Review[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 146: 107107.

[14] SUN Y, LI H, SUN L, et al. Failure Analysis of Floating Offshore Wind Turbines with Correlated Failures[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2023, 238: 109485

[15] 孟旭铮,于宁,韦一可,等. 42CrMo和$Cr_{12}MoV$合金钢在NaCl溶液中的腐蚀电化学行为分析[J]. 材料保护,2022,55(6):75-79.
MENG Xuzheng, YU Ning, WEI Yike, et al. Corrosion Electrochemical Behavior Analysis of 42CrMo and $Cr_{12}MoV$ Alloy Steels in NaCl Solution[J]. Materials Protection, 2022, 55(6): 75-79.

[16] LIU D, LI Y, XIE X, et al. Effect of Pre-corrosion Pits on Residual Fatigue Life for 42CrMo Steel[J]. Materials, 2019, 12(13): 2130.

[17] 贾文虎,徐群杰. 海上风电设施防腐蚀技术研究进展[J]. 发电技术,2023,44(5):703-711.
JIA Wenhu, XU Qunjie. Research Progress of Anti-corrosion Technology for Offshore Wind Power Facilities[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(5): 703-711.

[18] GONG J, LIU K, ZHENG Y, et al. Thermal-elastohydrodynamic Lubrication Study of Misaligned Journal Bearing in Wind Turbine Gearbox[J]. Tribology International, 2023, 188: 108887.

[19] 吴重仲,刘大勇,闫文吉,等. 海上风机螺栓用钢的腐蚀及疲劳行为[J]. 腐蚀与防护,2024,45(11):61-68.
WU Chongzhong, LIU Dayong, YAN Wenji, et al. Corrosion and Fatigue Behavior of Steel for Offshore Wind Turbine Bolts[J]. Corrosion and Protection, 2024, 45(11): 61-68.

[20] DIBAJ A, GAO Z, NEJAD A R. Fault Detection of Offshore Wind Turbine Drivetrains in Different Environmental Conditions through Optimal Selection of Vibration Measurements[J]. Renewable Energy, 2023, 203: 161-176.

[21] LU B, DIBAJ A, GAO Z, et al. A Class-imbalance-aware Domain Adaptation Framework for Fault Diagnosis of Wind Turbine Drivetrains under Different Environmental Conditions[J]. Ocean Engineering, 2024, 296: 116902.

[22] CIVERA M, SURACE C. Non-destructive Techniques for the Condition and Structural Health Monitoring of Wind Turbines: a Literature Review of the last 20 Years[J]. Sensors, 2022, 22(4): 1627.

[23] NEJAD A R, TORSVIK J. Drivetrains on Floating Offshore Wind Turbines: Lessons Learned over the Last 10 Years “, ” Antriebsstränge in Schwimmenden Offshore-Windkraftanlagen: Erkenntnisse Der Letzten 10 Jahres[J]. Forschung Im Ingenieurwesen, 2021, 85(2): 335-343.

[24] 王霄. 基于数据驱动的风电齿轮箱故障诊断研究[D]. 秦

皇岛：燕山大学，2023.
WANG Xiao. Research on Fault Diagnosis of Wind Turbine Gearbox Based on Data Driving[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023.
[25] BHARANI R, SIVAPRAKASAM A. A Review Analysis on Performance and Classification of Wind Turbine Gearbox Technologies[J]. IETE Journal of Research, 2022, 68(5): 3341-3355.
[26] BASHIR M BALI. Principle Parameters and Environmental Impacts that Affect the Performance of Wind Turbine: an Overview[J]. Arabian Journal for Science and Engineering, 2022, 47(7): 7891-7909.
[27] YIN J, MENG X, CHENG S. Enhancing Wind Turbine Energy Efficiency: Tribo-dynamics Modeling and Shape Modification[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2025, 208: 115071.
[28] 董伟. 基于时间序列复杂度和模态分解的风电机组齿轮箱关键部件故障诊断方法[D]. 秦皇岛：燕山大学，2023.
DONG Wei. Fault Diagnosis Method for Key Components of Wind Turbine Gearboxes Based on Time Series Complexity and Modal Decomposition[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2023.
[29] REHMAN S, ALAM M M, ALHEMS L M. A Review of Wind-turbine Structural Stability, Failure and Alleviation[J]. Wind and Structures, an International Journal, 2020, 30(5): 511-524.
[30] WU M, HAN X, TAO Y, et al. Lubrication Reliability Analysis of Wind Turbine Main Bearing in Random Wind Field[J]. Tribology International, 2023, 179: 108181.
[31] LÜDECKE F D, SCHMID M, REHE E, et al. Numerical Aspects of a Two-way Coupling for Electro-mechanical Interactions—a Wind Energy Perspective[J]. Energies, 2022, 15(3): 1178.
[32] 张景新，赵永生，樊翔，等. 海上浮式风力机支撑结构的流固耦合动力学研究[J]. 力学与实践，2022，44(5)：1093-1104.
ZHANG Jingxin, ZHAO Yongsheng, FAN Xiang, et al. Investigation of the Fluid and Structure Interaction for the Platform of Offshore Floating Wind Turbine[J]. Mechanics in Engineering, 2022, 44(5): 1093-1104.
[33] 张娇磊，余丁浩，李钢，等. 考虑腐蚀与疲劳耦合损伤的海上风机支撑钢结构抗震性能分析[J/OL]. 工程力学，2024：1-18[2026-03-15]. https://link.cnki.net/urlid/11.2595.o3.20241215.1100.002.
ZHANG Jiaolei, YU Dinghao, LI Gang, et al. Seismic Performance Analysis of Offshore Wind Turbine Supporting Steel Structures Considering Corrosion-fatigue Coupled Damage[J/OL]. Engineering Mechanics, 2024: 1-18[2026-03-15]. https://link.cnki.net/urlid/11.2595.o3.20241215.1100.002.
[34] 宋增国，刘淞仰，何泽文，等. 浮式风力机一体化流固耦合数值模拟方法进展[J]. 绿色能源，2024(1)：24-33.
SONG Zengguo, LIU Songyang, HE Zewen, et al. Advances in Integrated Fluid-structure Interaction Numerical Simulation Methods for Floating Wind Turbines[J]. Green Energy, 2024(1): 24-33.
[35] WIEGARD B, KÖNIG M, LUND J, et al. Fluid-structure Interaction and Stress Analysis of a Floating Wind Turbine[J]. Marine Structures, 2021, 78: 102970.
[36] 姜涛. 基于流固耦合方法的海上浮式风力机气动性能研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2023.
JIANG Tao. Aerodynamic Performance Study of Offshore Floating Wind Turbines Based on Fluid-structure Interaction Methods. Master's Thesis[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2023.
[37] SUO H, DENG K, ZHANG K, et al. Static/Fatigue Response and Degradation Behaviors of CFRP/Ti Bolted Joints under Salt-fog and Ultraviolet Synergistic Marine Environment[J]. Thin-Walled Structures, 2024, 203: 112251.
[38] DENG K, LUO B, SUO H, et al. Characterization of Material Degradation Mechanism of Carbon Fiber Reinforced Epoxy Resin Composites under Ultraviolet Radiation and Salt-fog Synergistic Environment[J]. Polymer Composites, 2024, 45(1): 805-824.
[39] USTINOV D A, SHAFHATOV E R. Assessment of Reliability Indicators of Combined Systems of Offshore Wind Turbines and Wave Energy Converters[J]. Energies, 2022, 15(24): 9630.
[40] FANG G, GAO X, SONG Y. A Review on Ceramic Matrix Composites and Environmental Barrier Coatings for Aero-engine: Material Development and Failure Analysis[J]. Coatings, 2023, 13(2): 357.
[41] HALL R, TOPHAM E, JOÃO E. Environmental Impact Assessment for the Decommissioning of Offshore Wind Farms[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 165: 112580.
[42] 张攀，张海瑞，罗添校，等. 漂浮式风电机组物理数值耦合模型风洞试验方法研究[J]. 工程热物理学报，2025，46(12)：4075-4086.
ZHANG Pan, ZHANG Hairui, LUO Tianxiao, et al. Research on Wind Tunnel Test Method of Physical-numerical Coupling Model for Floating Offshore Wind Turbines[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2025, 46(12): 4075-4086.
[43] ZHANG H, WEN B, LIU Y, et al. Equivalent Current Load Simulation for Floating Wind Turbines in Model Testing: Method and Experimental Validation[J]. Ocean Engineering, 2025, 341: 122557.
[44] 严茉芯，崔权维，周建星，等. 考虑失效相关的风电齿轮传动系统动态可靠性研究[J]. 太阳能学报，2024，45(8)：477-485.
YAN Moxin, CUI Quanwei, ZHOU Jianxing, et al. Research on Dynamic Reliability of Wind Power Gear Transmission System Considering Failure Correlation[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(8): 477-485.
[45] BADIHI H, ZHANG Y, JIANG B, et al. A Comprehensive Review on Signal-based and Model-based Condition Monitoring of Wind Turbines: Fault Diagnosis and Lifetime Prognosis[J]. Proceedings of the IEEE, 2022, 110(6): 754-806.
[46] YIN C, HUANG H, WANG D, et al. Tropical Cyclone-induced Wave Hazard Assessment in Hainan Island, China[J]. Natural Hazards, 2022, 113(1): 103-123.

（编辑　袁兴玲）

作者简介：刘世豪*（通信作者），男，1981年生，教授、博士研究生导师。研究方向为机械优化设计、风电设备可靠性。获省部级科技奖2项。E-mail:liushihao1102@126.com。

本文引用格式：
刘世豪，邱娜，林茂. 热带海洋环境下风电设备传动系统失效机理研究现状与展望[J]. 中国机械工程，2026，37(10)：2528-2539.
LIU Shihao, QIU Na, LIN Mao. Research Status and Prospects on Failure Mechanisms of Wind Turbine Transmission Systems in Tropical Offshore Environments[J]. China Mechanical Engineering, 2026, 37(10): 2528-2539.