1 Research background and current situation

Chinese marine engineering manufacturing industry has achieved great progress since the implementation of the national maritime strategy, *Towards Deep Blue*. Guangdong Province has also clearly proposed to actively develop the marine engineering equipment industry in *the 13th five-year plan* for the development of strategic emerging industries but restricted by severe material failure under complicated marine environment, especially in the South China Sea. Therefore, it is urgent to establish an intelligent evaluation and management system for the service performance of marine engineering equipment materials, so as to provide technical support for their safety service and life extension.

The rapid development of new generation of information technology in recent years makes the appliance of digital twin system in industries available. The digital twin system for engineering materials performance evaluation proposed in our project will extract physical model from huge amount of material service performance data, which is acquired from experiments under multiscale, multifield coupling and various failure conditions, and combine data mining and artificial intelligence to construct the digital simulation model for failure dynamics that builds the mapping between simulation and practical engineering materials and equipments. Taking the advantage of the iteration of on-site and real-time inspection data, our system will be able to improve simulated prediction model to obtain higher accuracy on the evaluation of service performance of materials. However, the system can’t be co

Due to the lack of data of service performance of complicated marine engineering material and inadequate research on its failure mechanism, the validation and optimization of the prediction model in the system can’t be executed, which are also affected by the deficiency of on-site inspection and the inability to assess the service performance of huge, full scale entity subsection, or scalable equipment.

Thus, our project plans to employ the resource contained in the national major science and technology infrastructure of the initiating unit, experiments of huge and full scale materials under complicated service conditions, software and hardware platform for simulation and safety assessment, and selects the marine engineering equipment as research material and develops detection system to inspect environmental load spectrum and service status by material-component-equipment multifield experiments and simulation. We expect to acquire data of service performance of equipment material under multifield coupling environment from various aspects, and extracts the failure mechanism and the influence of environmental factors on models, and connect the digital twin system for engineering materials performance evaluation with the prediction technology of life span

打通海工装备服役性能数字孪生评价与寿命预测技术与方法体系，

解决我国乃至全球海工领域的前沿与难点问题。

**（二）科学问题**

为开发海工装备材料服役性能数字孪生评价系统，需揭示多场多因素耦合环境下工程材料服役性能的跨尺度关联及其经时演化规律，解决其中的核心科学问题，即工程材料服役性能评价中的“尺度域”、“环境域”和“时间域”科学问题及三者间的耦合效应。



* **尺度域科学问题（即尺寸效应）**——目前实验室积累的海工钢实验数据多基于试片级样品的测试结果，但由于结构中成分和微观组织结构的不均匀性（如材料中的夹杂相、偏析、缺陷等）、及装备中的焊接部位、紧固和动连接部位等的异金属连接和缝隙结构等，试片级样品数据往往不能很好地预测结构/装备的服役行为，需揭示海工材料成分-组织结构-环境载荷-服役性能间的内在联系，建立海工用钢微观与宏观性能、小尺寸材料与大尺寸材料性能、材料与结构性能间的相关性。
* **环境域科学问题（即环境耦合效应）——**海工装备不同部位服役于海洋大气区（盐雾环境、日光照射的老化效应和热效应）、浪溅区、潮差区、全浸区、海泥区等不同的海洋环境，同时受到自身结构载荷、加工残余应力、风载荷、浪涌载荷等复杂力学因素影响，还取决于其表面涂层防护体系及水下区阴极保护系统的工作状态。解决环境域科学问题在于揭示以上多场多环境因素环境载荷对工程材料服役行为的复杂非线性耦合作用机制与规律。
* **时间域科学问题（即时间效应）**——围绕海工装备剩余寿命预测及延寿评价需求，需掌握复杂力化耦合环境下材料服役性能的经时非线性演化特性。其关键在于提炼实验室（加速）评价方法，并与现场服役数据对比验证其等效性，从而构建材料服役性能的经时演化模型，为依据短时间服役数据推演长期服役行为奠定基础。

**（三）研究内容**

**1．研究落脚点选取**

海工材料和装备种类繁多、服役环境复杂多样、各种失效形式交织耦合。为了能够快速有效地建立海工装备材料服役性能的数字孪生评价方法，需选取一种典型的海工装备作为研究对象。

海上风电在我国正进入加速发展阶段。至2030年，广东省规划建设海上风电场址23个，总装机容量将达到6685万千瓦。目前风电建设选址多为潮间带，其服役环境比海洋平台更为苛刻，钢结构表面干湿交替更为频繁，海洋生物/微生物的对结构表明对污损更为严重，浪涌及浪花飞溅作用更为显著。在海上特有的风载与海洋恶劣腐蚀环境的耦合作用，使得海工装备材料的失效形式也更加复杂多样。同时，随着我国海上风电逐步向远海发展，迫切需要建立服役状态远程监控及风险评价与维护决策的实时管理系统。但由于我国海上风电运营年限尚短，相比于其它海工装备更加缺乏材料服役性能数据及失效机理积累，尚未形成服役性能评价与寿命预测方法体系。

因而，**本项目选取产业发展需求迫切、具有典型性、目前服役性能评价积累较为薄弱的海上风电装备作为研究落脚点，打通上述工程材料服役性能评价中的关键科学问题解决路径**，建立海上风电装备材料服役性能的数字孪生评价方法体系，并开展示范应用。

**2. 研究内容**

**1）多场多因素耦合环境下海上风电装备材料多尺度性能评价**

以海上风电典型金属材料、结构（焊接区与连接部位）、关键装备及其防护体系为研究对象，采集其南海海洋大气/海水及特殊风载、浪载等多场多因素服役环境载荷谱，研发材料-构件-装备多尺度（加速）评价试验方法，开展近工况复杂力化耦合环境条件下典型材料、结构与装备服役性能的多尺度实验室评价研究与数据积累，明确腐蚀-疲劳耦合作用下装备材料失效机理及各因素影响规律模型。

**2）海上风电装备材料服役性能的跨尺度建模仿真**

以多因素耦合条件下海上风电装备材料服役性能演化机理模型为基础，对海上风电装备材料服役行为进行多尺度数字建模仿真；通过各尺度模拟间关键参数的跨尺度传递及区域嵌套等方式，实现材料/结构环境损伤行为的跨尺度关联；结合仿真结果与前述多尺度实验数据的对比验证，修正仿真模型与参数，共同支撑对装备材料失效机理与规律的深入解析；同时，相应的机理模型与数据关联可以作为物理信息融合基础，支撑后续海上风电数字孪生系统的构建。

**3）海上风电装备服役载荷谱及健康状态实时监检测技术研发**

基于海上风电装备服役特点，开发适用于海洋环境的全固态环境因子监测传感器和基于多电极技术的腐蚀特征量监测传感器，并基于物联网技术，开展适用于大型海上风电装备服役和防护状态实时监测系统和设备研发，以获取海上风电装备服役中关键部件应力应变水平等服役状态数据、所处局域环境及其腐蚀性监测数据、及阴极保护等防护体系的工作状态数据，为海上风电装备健康状态评估及关键部件维护策略的选择与优化提供支撑。

**4）海上风电装备材料服役性能数字孪生原型系统开发**

基于海上风电装备材料服役性能的多尺度实验评价数据、数值仿真数据，同时收集相关服役失效案例，突破海上风电装备材料多源异构数据融合方法、全寿命周期评价模型以及关键材料失效溯源与寿命预测等关键技术，重点针对其中关键组成部分，建立“材料-构件-子系统-整机装备”数字孪生原型系统，实现对装备局域环境严酷性分级和关键部件风险等级划分，初步形成海上风电装备材料失效概率分析与寿命预测能力。

**5）****海上/风电/装备/服役性能/智能化/评价系统/技术集成与验证**

开展数字孪生原型系统和在线监检测系统与海上风电装备现有监控和运维系统的技术集成，利用数字孪生系统提供的相关数据、模型、方法及工具，实现对海上风电装备的安全评价。完成海上风电装备数字孪生评价系统的示范性应用，基于现场实时监测数据，迭代优化失效概率与寿命预测模型，最终形成一套集海上风电装备服役状态监测、服役安全性评估与预测、风险预警及防护决策建议功能为一体的实时智能化数字孪生评价系统。

5) Technical integration and validation of the intelligent performance evaluation system for offshore wind power equipment in service