**（一）研究背景及现状**

随着“走向深蓝”国家海洋战略的实施，我国海洋工程装备制造业取得了长足进步。广东省在战略性新兴产业发展“十三五”规划中也明确提出要积极发展海洋工程装备产业。但是海洋环境尤其是南海复杂苛刻环境下材料失效问题非常严重，已成为制约海洋战略发展的技术瓶颈。因此，亟待建立针对海工装备材料服役性能的智能化评价管理系统，为其安全服役及延寿提供技术保障。

近年来，随着新一代信息技术的高速发展，数字孪生系统在工程材料服役安全评价中开始得到应用。工程材料服役数字孪生评价系统是通过多尺度、多场耦合环境下材料失效过程的实验研究，积累海量服役性能数据，提炼物理模型，并结合数据挖掘和人工智能技术建立数字化模型，实现材料失效过程的多尺度、多物理场仿真，构建实际工程材料和装备的虚拟空间映射，借助其与现场实时监检测结果的多重迭代，优化仿真预测模型，实现对工程材料和装备服役性能的精准评价、预测与三维可视化。然而，由于对复杂海洋环境下工程装备材料服役性能数据和失效机理的研究与积累不足，同时因缺乏现场监检测和大/全尺寸实体分段或缩比装备服役性能的实验室评价能力而无法完成模型验证与优化，所以目前尚未形成海工装备材料服役性能数字孪生评价系统。

因而，本项目拟依托牵头单位拥有的国家重大科技基础设施中针对大尺寸/全尺寸材料/结构在复杂工况环境下服役性能的实验、仿真与安全评价软硬件平台和能力，选取典型海工装备作为落脚点，通过材料-构件-装备多尺度实验及建模仿真研究，研发环境载荷谱与服役状态的监检测系统，多层面获取复杂多场耦合环境条件下装备材料服役性能数据，综合提炼失效机理及各因素影响规律模型，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。