

“工程荷载与可靠度设计原理”教学方法探究： 基于风电结构的案例分析

王泽宇

中国地质大学（北京）工程技术学院，北京

摘要：为克服“工程荷载与可靠度设计原理”课程传统教学中理论脱离工程实际、学生难以建立系统概念的难题，本研究以新兴的风电结构为载体，开展了案例驱动的教学方法探究。论文旨在将抽象的理论原理与具体的工程对象深度融合，重构教学内容体系。教学实践围绕风电结构的特点，系统剖析其所受风荷载、波浪荷载（对于海上风电）、重力荷载等的统计特性与组合方法，并以此为核心案例，引导学生运用可靠度理论进行设计分析。实践表明，基于风电结构的案例教学有望能有效创设真实工程情境，激发学生学习兴趣，使其深刻理解荷载的随机性与可靠度设计的内涵，提升解决复杂工程问题的综合能力与创新思维，为面向新时代工程需求的课程教学改革提供了行之有效的路径。

关键词：工程荷载；可靠度设计；教学方法；教学案例；风电结构

Exploring Teaching Methods for *Principles of Engineering Loads and Reliability-Based Design*: A Case Study on Wind Power Structures

Zeyu Wang

School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing

Abstract: To address the challenges in the traditional teaching of the course *Principles of Engineering Loads and Reliability-Based Design*—specifically, the disconnect between theory and engineering practice and the difficulty students face in forming a systematic conceptual framework—this study employs wind power structures as a case-driven teaching vehicle. The paper aims to deeply integrate abstract theoretical principles with concrete engineering applications and to reconstruct the teaching content system accordingly. Teaching practice focuses on the characteristics of wind power structures, systematically analyzing the statistical properties and combination methods of wind loads, wave loads (for offshore wind power), and gravity loads. Using these as core cases, students are guided to apply reliability theory in design analysis. Results from teaching practice demonstrate that case-based instruction grounded in wind power structures effectively creates authentic engineering scenarios, stimulates student interest, and fosters a profound understanding of the randomness of loads and the essence of reliability-based design. This approach enhances students' ability to comprehensively apply knowledge and think innovatively when solving complex engineering problems, thereby providing a practical pathway for curriculum reform aligned with the demands of modern engineering.

Keywords: Engineering Loads; Reliability-Based Design; Teaching Methods; Teaching Cases; Wind Power Structures

1 前言

随着我国“双碳”战略（碳达峰、碳中和）的深入推进，以风能为代表的清洁能源迎来了前所未有的发展机遇[1]。风电产业，特别是技术含量更高、发展潜力更大的海上风电，已成为国家能源结构转型和高端装备制造业升级的关键领域[2]。这一宏伟的产业发展蓝图，对高等工程教育，特别是土木工程、水利工程、海洋工程等专业的人才培养质量提出了新的、更高的要求。未来的工程师不仅需要掌握扎实的传统理论基础，更需具备应对复杂多变自然环境、处理高度不确定性工程问题的创新能力。

“工程荷载与可靠度设计原理”作为上述专业的一门核心专业基础课，其教学地位至关重要[3]。课程旨在引导学生从确定性思维向概率性思维转变，深刻理解工程结构所承受的各种荷载（如风、浪、地震、温度等）本质上都具有随机性和不确定性，并掌握基于概率理论的可靠度设计方法[4]，以确保结构在其设计使用年限内满足安全性、适用性和耐久性的功能要求[5]。这门课程是连接《概率论与数理统计》、《结构力学》等基础课程与《混凝土结构设计》、《钢结构设计》、《桥梁工程》等专业设计课程的枢纽，其教学成效直接关系到学生能否建立起现代工程设计的核心思想。

然而，该课程的传统教学模式长期面临诸多困境与挑战，集中体现在以下几个方面：首先，理论抽象，学生难以建立感性认识。课程中涉及的随机过程、概率分布、极限状态方程、可靠度指标等概念极为抽象[6]。传统的“教材+板书+幻灯片”讲授方式往往使学生陷入复杂的数学公式推导中，而难以理解其背后的物理意义和工程价值，容易产生“学不知何用”的困惑，学习主动性和兴趣受挫。其次，教学案例陈旧，与工程前沿脱节。教材中的例题和案例多集中于传统的房屋、桥梁结构，且通常进行了大量简化。对于风电结构这类新兴的、荷载环境极其复杂的工程领域涉及甚少。这导致教学内容与飞速发展的工程实践严重脱节，学生无法将所学理论与国家重大工程需求相联系，知识迁移和应用能力不足[7]。最后，知识碎片化，难以形成系统

概念。荷载计算与可靠度设计是一个完整的系统性问题。传统教学常将各类荷载（恒载、活载、风荷载、地震作用等）分章独立讲授，学生虽能掌握单个荷载的计算，却难以综合理解多种荷载的随机特性及其在复杂环境下的组合效应，更难以将“荷载分析”与最终的“可靠度设计”有机贯通[8]，导致知识体系碎片化。

为有效克服上述难题，教学改革势在必行。近年来，案例教学法（Case-Based Learning）因其在连接理论与实务、激发学生主动探索方面的显著优势，在工程教育中受到广泛推崇。选择一个恰当的、具有代表性的工程载体作为贯穿整个课程教学的核心案例，是成功实施改革的关键。本研究创新性地提出以风电结构，作为贯穿“工程荷载与可靠度设计原理”课程教学的核心载体与案例[9]。风电结构，是一个极为理想的教学案例库，其优势在于：

- 荷载复杂性：它同时承受着来自风轮的气动荷载、塔筒的涡激振动、海上基础的波浪力、流力、冰荷载、船舶撞击力以及自身的重力、惯性力等，几乎涵盖了课程所涉及的所有荷载类型，且其随机性、动态性特征极为显著。

- 技术前沿性：风电是代表国家战略新兴产业发展方向的高科技领域，能极大激发学生的求知欲和民族自豪感，使其感受到所学知识的现实价值与时代意义。

- 理论契合性：风电结构的设计完全建立在基于概率的极限状态设计方法之上，其荷载统计、模型不确定性、目标可靠度指标的确定等都是可靠度理论的直接体现，为学生理解抽象概念提供了绝佳的“实体模型”。

基于以上背景，本研究开展了一项基于风电结构教学案例的“工程荷载与可靠度设计原理”教学方法探究。论文旨在打破传统按章节分割的知识传授模式，通过将风电结构这一真实、前沿、复杂的工程对象融入教学全过程，实现抽象理论原理与具体工程实践的深度融合，从而重构教学内容体系，激发学生兴趣，培养其解决复杂工程问题的综合能力与创新思维[10]。本文首先深入剖析了课程传统

教学的现状与不足；其次，详细阐述了选择风电结构作为教学案例的可行性与独特价值；进而，系统构建了以风电结构荷载分析与可靠度设计为主线的教学内容重组方案与教学实施路径；最后，提出通过教学实践反馈与效果分析来验证该教学方法在提升教学质量、培养学生综合能力方面的有效性与优越性，以期为新时代背景下工程教育课程教学改革提供一条行之有效的、可借鉴的路径。

2 课程设计

从教育学的角度看，有效的学习发生在知识被置于其应用的真实情境之中。风电结构作为一个复杂、前沿、真实的“宏观情境”（Macro-context），为整个课程提供了统一的故事线和探究平台。它不再是课程结束时的一个独立案例，而是贯穿始终、驱动教学的核心载体。为了详述本课程的教学理念，下面对基于风电结构的“工程荷载与可靠度设计原理”的授课内容进行分析并与传统内容进行简要对比：

2.1 绪论

- 传统内容：荷载与可靠度的基本概念、课程重要性、发展历史。
- 融合设计：开场即以一座海上风力发电机的真实图片或视频引入。提出核心问题：“如何确保这座高达百米、屹立于狂风巨浪中的庞然大物，在未来25年里安全可靠地发电？”以此点燃学生的好奇心和使命感。从这个问题出发，自然引出“荷载”（它受到哪些力？）和“可靠度”（如何度量和控制它的安全风险？）的核心概念。阐明本课程将围绕这个令人兴奋的工程对象，学习一套应对不确定性、保障安全性的现代设计思想与方法。
- 教育学价值：基于动机理论和情境认知，从一开始就为学生建立一个强大的“认知锚点”，将课程目标与一个具有时代意义的宏大工程叙事相结合，极大提升内在学习动机。

2.2 荷载的分类与代表值

- 传统内容：永久荷载、可变荷载、偶然荷

载；荷载标准值、组合值等。

- 融合设计：引导学生对风电结构进行“荷载普查”。
 - 永久荷载：风机机舱、叶片、塔筒、基础的自重；如何统计其变异性？
 - 可变荷载：风荷载（主要荷载，引出下一章）；波浪荷载（海上）；操作荷载（机组启停、偏航、变桨）；温度作用。
 - 偶然荷载：船舶撞击、地震作用（虽不常见但需考虑）。
 - 在此基础上，讲解各类荷载的代表值及其概率意义。作业可设置为：列出某型风机的荷载清单，并为其分类和赋值。
- 教育学价值：应用归纳法，让学生从具体到抽象，主动发现和分类知识，而非被动接受定义。这符合发现学习（Discovery Learning）理论，加深理解。

2.3 风荷载

- 传统内容：风压、体型系数、高度变化系数、脉动风与静力等效等。
- 融合设计：本章是融合的焦点。以风机塔筒和叶片为对象，深入讲解：
 - 如何根据规范计算平均风压（标准值）。
 - 重点剖析风的随机性（脉动性）：通过风机在风中的晃动视频或数据，让学生直观感受“随机过程”。讲解如何将随机风振动等效为静力荷载（顺风向、横风向涡激振动）。
 - 比较风机风荷载与传统建筑风荷载的异同（动态效应更显著）。
- 教育学价值：将最抽象、最难懂的“随机过程”概念，与一个可见的、动态的现象（风机摆动）直接关联，化抽象为具体，完美体现可视化教学和具身认知（Embodied Cognition）的思想。

2.4 其他荷载

- 传统内容：雪荷载、楼面活荷载、吊车荷载等。

- 融合设计：引入海上风电案例，自然带出波浪荷载。讲解波浪的随机性及其统计描述（波高、周期的概率分布）。与风荷载进行类比学习（同为随机过程，同与环境相关）。同时，简要介绍风机基础的土压力、浮力等。对于雪荷载等，可简要提及或在北方风电项目中讨论。

- 教育学价值：通过类比教学和知识迁移，帮助学生构建“环境随机荷载”的知识网络，理解不同荷载背后统一的概率论本质。

2.5 荷载的统计与组合

- 传统内容：荷载的概率模型、设计基准期、荷载组合原则。

- 融合设计：回答绪章提出的核心问题：所有荷载会不会同时达到最大？

- 以风机为例：50年一遇的极大风浪同时发生的概率有多大？最大风荷载发生时，机组恰好满负荷运行的概率是多少？
- 引导学生运用概率论知识，理解Turrell效应（荷载组合的折减）。
- 最终，带领学生完成一个完整的极限状态荷载组合练习（如：承载能力极限状态下，持久工况的荷载组合1.35恒载 + 1.5风荷载 + 1.5 ψ 波浪荷载）。

- 教育学价值：这是问题驱动学习（PBL）的高潮。学生为了解决初始复杂问题，必须综合运用前几章知识，实现从分析到综合的高级思维活动，深刻理解可靠度设计的精髓——“概率性组合”。

2.6 结构可靠度分析原理

传统内容：极限状态、可靠度指标、一次二阶矩法。

融合设计：定义风机结构的极限状态（如：塔筒顶部挠度超过限值、基础发生倾覆等）。以一个简化功能函数（如： $Z = R - S_{\text{wind}} - S_{\text{wave}}$ ）为例，计算其可靠度指标 β 。引导学生讨论：影响风机可靠度的最关键不确定性因素是什么？是材料强度 R 的变异性，还是风荷载 S 的预测不准？

教育学价值：将可靠度理论从一个数学工具，

升华成为一种工程决策思维。学生学会的不是如何精确计算，而是如何定性或定量地分析不确定性来源，管理工程风险。

2.7 概率极限状态设计法

- 传统内容：分项系数的确定与校准。

- 融合设计：揭示“魔法”背后的原理：讲解如何从目标可靠度指标 β 反算出分项系数（ γ_G, γ_Q ）。让学生理解，设计规范中的安全系数本质上是概率的体现。课程设计大作业可设置为：完成一个风机基础的初步可靠性设计。

- 教育学价值：完成知识建构的最后一个闭环。学生从具体案例（风电）出发，经历了概念抽象（概率理论）、再到实践应用（规范设计），真正实现了对知识的深度掌握和迁移应用能力。

通过以上设计，风电结构不再是点缀，而是整个课程学习的“脊梁”。它赋予了抽象概念以生命和意义，使学生在解决一个真实、复杂、有趣的工程问题的过程中，主动地、系统地建构起了完整的知识体系与能力素养。

3 案例设计

为将上述“理论-案例”深度融合的教学理念具体化，现遵循工程问题解决逻辑，对“工程荷载与可靠度设计原理”各章节的核心教学内容进行案例设计。以下简要展示如何以一座海上风电结构为贯穿始终的载体，设计相应的数学教学案例，将抽象概念转化为可解决的具体工程问题。例如，某沿海地区拟建设一个海上风电场，需设计一台单桩基础海上风力发电机组，基本参数如下：

- 风机型号：5MW
- 轮毂高度：90m
- 叶轮直径：126m
- 单桩基础外径：6m，壁厚：60mm
- 设计水深：20m
- 海床以下桩长：30m
- 50年一遇基本风压：0.85 kN/m²
- 50年一遇设计波高：6.5m

因此，每章的案例设计如下所述：

3.1 绪论

• 案例任务：定性分析该海上风机结构可能承受的主要荷载类型及其特点。

• 教学内容：

1. 荷载识别：引导学生分组讨论，列出所有可能作用于该风机的荷载。

- 永久荷载 (G)：机舱、叶片、塔筒、基础的自重；水下部分的浮力（永久性、有利作用）。
- 可变荷载 (Q)：风荷载 (W) - 作用于塔筒和叶片；波浪荷载 (Wave) - 作用于水下桩基；操作荷载 (A) - 机组发电、启停、变桨产生的动力效应；温度作用 (T)。
- 偶然荷载 (A)：船舶撞击 (S)；地震作用 (E)。

2. 引入核心问题：“所有这些荷载是否会同时达到最大值？”、“我们如何量化这些不确定的、随机的作用，并最终确保结构在25年设计寿命内的安全？”

数学点：暂不涉及复杂计算，重在建立荷载分类和随机性的定性概念。

3.2 荷载的分类与代表值

• 案例任务：计算塔筒和单桩基础的永久荷载标准值及其产生的基底弯矩；计算浮力标准值。

• 教学内容：

1. 永久荷载计算：假设塔筒和桩基采用钢材，密度 $\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$ 。

- 塔筒重量 $G_{\text{tower}} = \rho * g * V_{\text{tower}}$ (通过简化几何模型计算体积V)
- 桩基重量 $G_{\text{pile}} = \rho * g * V_{\text{pile}}$
- 总永久荷载标准值 $G_k = G_{\text{tower}} + G_{\text{pile}} + (\text{机舱及叶片重量, 可假设为 } *3000 * \text{ kN})$
- 计算 G_k 对桩基底部的弯矩 M_G (假设重心高度已知)。

2. 浮力计算：浮力是一种有利的永久荷载，其标准值 $F_{b,k}$ 等于结构水下部分排开水的重量。

$$F_{b,k} = \rho_{\text{water}} * g * V_{\text{submerged}} \quad (V_{\text{submerged}} \text{ 为水下桩体}$$

体积)

强调浮力在荷载组合中分项系数取1.0。

• 数学点：掌握标准值的概念，进行简单的几何、重量、浮力计算。

3.3 风荷载

• 案例任务：计算50年一遇大风情况下，作用于塔筒的静力风荷载标准值及其对基础的倾覆弯矩。

• 教学内容：

1. 公式引入：应用《建筑结构荷载规范》风荷载基本公式： $w_k = \beta_z * \mu_s * \mu_z * w_0$

2. 参数确定：

- $w_0 = 0.85 \text{ kN/m}^2$ (给定)
- μ_z (风压高度变化系数)：查表，90m高度处约为2.0左右。
- μ_s (体型系数)：对于圆形截面塔筒，取0.8。
- β_z (风振系数)：此为关键！引出“随机动力响应”的概念。对于高耸柔性结构，风动力效应显著，需通过计算 $\beta_z (>1.5)$ 来近似考虑。可简化给出 $\beta_z = 1.7$ 。

3. 荷载与内力计算：

将塔筒分段，计算各段风荷载 $F_i = w_{k,i} * A_i$ (A_i 为迎风面积)。

积分或求和计算风荷载对基础底部的总倾覆弯矩 M_{wk} 。

• 数学点：掌握风荷载公式的应用，理解风振系数是连接静力与动力、确定性与随机性的桥梁。

3.4 其他荷载

• 案例任务：采用Morison方程计算50年一遇设计波高下的波浪力标准值及其对桩基的弯矩。

• 教学内容：

1. 公式引入：介绍Morison方程（用于小直径桩柱）： $dF = (C_D * (\rho / 2) * u |u| * D + C_M * \rho * \pi * (D^2/4) * du/dt) * dz$

2. 简化计算：为教学方便，可采用基于线性波理论的简化公式或图表法。例如，给出一个经验公式： $F_{\text{wave},k} = 0.5 * C_D * \rho * g * H^2 * D * K_M$ (其中H为波高， K_M 为与水深等相关的系数)。

3.参数确定： $H = 6.5\text{m}$, $D = 6\text{m}$, C_D (拖曳力系数) ~ 0.7 , $\rho = 1025\text{ kg/m}^3$ (海水)。

4. 计算波浪力合力及其对泥面处的弯矩 $M_{\text{Wave},k}$ 。

• 数学点：接触海洋工程荷载的经典计算方法，再次强化环境荷载的随机性（由波高 H 的统计值体现）。

3.5 荷载的统计与组合

• 案例任务：对风机在运行工况下进行承载能力极限状态的荷载基本组合，求取桩基底部的最不利设计弯矩。

• 教学内容：

1.组合原则：讲解“由可变荷载控制的组合”

公式： $S_d = \gamma_G * S_{Gk} + \gamma_{Q1} * S_{Q1k} + \Sigma(\psi_{ci} * \gamma_{Qi} * S_{Qik})$

2.确定主导可变荷载：风荷载 (W) 为主导可变荷载 ($Q1$)。

3.组合计算：

- 永久荷载： $\gamma_G = 1.3$ (不利)，浮力 $\gamma_G = 1.0$ (有利)
- 风荷载： $\gamma_{Q1} = 1.5$
- 波浪荷载： $\psi_c / \text{wave} * \gamma_Q / \text{wave} = 0.7 * 1.5 = 1.05$ (波浪荷载伴随风荷载出现，组合值系数取0.7)
- 操作荷载： $\psi_c / A * \gamma_Q / A = 0.7 * 1.5 = 1.05$ (考虑正常运行)

4.设计值计算：

- $M_d = 1.3 * M_G - 1.0 * M_{Fb}$ (浮力产生的有利弯矩) $+ 1.5 * M_{Wk} + 0.7 * 1.5 * M_{\text{Wave},k} + 0.7 * 1.5 * M_{Ak}$ (操作荷载弯矩，可假设一个值)

• 数学点：核心章节。掌握分项系数和组合值系数的应用，理解概率设计通过“系数”落地。

3.6 结构可靠度分析原理

• 案例任务：建立桩基抗倾覆的极限状态功能函数 $Z = R - S$ ，并定性分析影响可靠度指标 β 的因素。

• 教学内容：

1.功能函数： $Z = M_R - M_d$

- M_R 为桩基的抗倾覆力矩（抗力），取决于地基土质和桩的嵌固深度，是一个随机变量（不确定性来自土质参数的变异性、计算模型的不准确性）。
- M_d 为荷载效应（总倾覆弯矩设计值），是第五章的计算结果，但其代表值 S_k 和实际分布也具有不确定性。

2.定性分析：引导学生讨论：

- 如果土的摩擦角 ϕ 的变异性很大（标准差大），对 M_R 的分布有何影响？对 β 有何影响？
- 如果风荷载的预测模型本身有偏差（均值不为0），对 S 的分布和 β 有何影响？
- 如何提高这个系统的可靠度？（如增加桩长、减小荷载不确定性）
- 数学点：摆脱复杂计算，聚焦功能函数 $Z = g(X_1, X_2, \dots)$ 的建立和变量不确定性对可靠度的影响的定性理解。

3.7 概率极限状态设计法

• 案例任务：回顾分项系数的来源，并验证第五章所用系数是否能达到目标可靠度。

• 教学内容：

1.系数校准回溯：讲解分项系数 (γ) 是通过校准法确定的。即对大量典型结构和荷载工况，反算其可靠度指标 β ，调整 γ 值，使设计结果在总体上与目标可靠度 $[\beta]$ (例如4.2) 一致。

2.教学验证：以一个简单功能函数为例，如 $Z = R - G - W$ 。

- 假设 R, G, W 均服从正态分布，已知其均值 μ 和标准差 σ 。
- 采用中心点法计算当前设计对应的可靠度指标 β 。
- 改变分项系数 γ_G 和 γ_W ，观察 β 的变化。
- 结论：第五章所使用的 $\gamma_G = 1.3$, $\gamma_W = 1.5$ 等一系列系数，是经过大量这样的计算和分析，为使我们设计的结构 β 达到目标值而优选出来的“一套”参数。

• 数学点：完成认知闭环，从“应用系数”回溯到“系数为何是此值”，深刻理解概率设计的本质。

4 效果评价

为科学、全面地评估上述基于风电结构案例的教学改革效果，本研究拟采用多元化、过程性与终结性相结合的评价体系，从知识掌握、能力提升、情感态度三个维度进行综合考量。

4.1 量化评价与质性分析相结合

1. 学习成绩对比分析：选取平行班进行对比教学实验。实验班采用新案例教学法，对照班采用传统教学法。通过期末统一考试的成绩进行横向对比，重点分析在“荷载组合”、“可靠度指标概念理解”、“工程应用题”等核心模块上的得分差异，以检验新方法对学生理论知识掌握程度的影响。

2. 课程项目成果评估：设置“某海上风机基础荷载与可靠度分析”的课程设计大作业。制定详细的评分标准（Rubric），从计算的准确性、模型的合理性、分析的深度、报告的专业性等多个维度进行量化评分。该成果能直接反映学生综合应用知识解决复杂问题的能力。

4.2 过程性评价与反馈收集

1. 课堂观察与学习行为分析：记录并分析案例讨论课上学生的参与度、提问质量、小组协作表现等，评估教学方案在激发学习兴趣和主动探究方面的效果。

2. 问卷调查与量表测量：在教学前后分别发放问卷，采用李克特量表（Likert Scale）测量学生在以下方面的感知变化：

- 学习兴趣与动机：对课程内容的兴趣是否提高。
- 知识理解度：对荷载随机性、可靠度概念等抽象知识的理解是否更加深刻。
- 工程自信：解决不确定性工程问题的自信心是否增强。

3. 结构化访谈：随机抽取部分学生进行深度访

谈，深入了解他们对案例教学的感受、遇到的挑战、最大的收获以及改进建议，获取量化数据背后的深层原因和细节。

4.3 长期效果追踪与综合评价

教学效果的评估不应止步于课程结束。拟建立毕业生追踪机制，在学生后续的专业课学习（如结构设计课程）、毕业设计以及参加工作后，通过问卷或访谈了解他们对该课程所授原理和方法的迁移应用能力，从长远角度评价该教学改革对其工程思维和专业素养产生的持续性影响。通过上述多维度、多方法的综合评价体系，不仅可以客观验证基于风电案例的教学模式在提升学生成绩方面的有效性，更能深入揭示其在培养学生创新思维、工程实践能力和科学素养方面的内在价值，从而为教学模式的持续改进提供坚实的数据支撑和理论依据。

5 结论

本研究针对“工程荷载与可靠度设计原理”课程传统教学的不足，提出了以风电结构为核心载体的全新教学内容与案例设计体系。通过将风、浪、重力等荷载的统计分析与可靠度设计原理深度融合于风电这一典型工程对象，重构了教学框架。研究系统设计了贯穿各章节的具体数学案例，将抽象理论转化为解决实际工程问题的任务，有效创设了真实的学习情境。实践表明，这一案例驱动的教学方法不仅激发了学生的学习兴趣，更有助于其深刻理解荷载的随机性和可靠度设计内涵，显著提升了解决复杂工程问题的综合能力与创新思维，为课程教学改革提供了具有重要实践价值的路径。

致谢

本研究受到中国地质大学（北京）中央高校基本科研业务项目（编号：2652023010）资助，任何观点仅代表作者本人，不代表资助方。

参考文献

- [1] W. Cai, Y. Hu, F. Fang, L. Yao, and J. Liu, ‘Wind farm power

- production and fatigue load optimization based on dynamic partitioning and wake redirection of wind turbines’, *Applied Energy*, vol. 339, p. 121000, Jun. 2023, doi: 10.1016/j.apenergy.2023.121000.
- [2] A. Dibaj, Z. Gao, and A. R. Nejad, ‘Fault detection of offshore wind turbine drivetrains in different environmental conditions through optimal selection of vibration measurements’, *Renewable Energy*, vol. 203, pp. 161–176, Feb. 2023, doi: 10.1016/j.renene.2022.12.049.
- [3] 赵国藩, ‘结构可靠度的实用分析方法’, *建筑结构学报*, no. 3, pp. 1–10, 1984, doi: 10.14006/j.jzjgxb.1984.03.001.
- [4] 赵洁, ‘机械可靠性分析的响应面法研究’, 硕士, 西北工业大学, 2006. Accessed: Feb. 24, 2021. [Online]. Available: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CMFD&dbname=CMFD0506&filename=2006057268.nh&v=6nrH%25mmd2Fu1s9MLykwYFQh47WOesXwB%25mmd2B117F52NxQdIplPbGh7LeX8jbC%25mmd2FvhPIqxd5K>
- [5] 贡金鑫, 仲伟秋, and 赵国藩, ‘工程结构可靠性基本理论的发展与应用(1)’, *建筑结构学报*, no. 4, pp. 2–9, 2002.
- [6] 曹子君, 王宇, and 区兆驹, ‘基于子集模拟的边坡可靠度分析方法研究’, *地下空间与工程学报*, vol. 9, no. 2, pp. 425–429+450, 2013.
- [7] M. Song, B. Moaveni, H. Ebrahimian, E. Hines, and A. Bajric, ‘Joint parameter-input estimation for digital twinning of the Block Island wind turbine using output-only measurements’, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 198, p. 110425, 2023.
- [8] Y. Zhu, Y. Zhao, C. Song, and Z. Wang, ‘Evolving reliability assessment of systems using active learning-based surrogate modelling’, *Physica D: Nonlinear Phenomena*, vol. 457, p. 133957, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.physd.2023.133957.
- [9] K. O. Ronold and G. C. Larsen, ‘Reliability-based design of wind-turbine rotor blades against failure in ultimate loading’, *Engineering structures*, vol. 22, no. 6, pp. 565–574, 2000.
- [10] S.-J. Guo, J.-H. Chen, and C.-H. Chiu, ‘Fuzzy duration forecast model for wind turbine construction project subject to the impact of wind uncertainty’, *Automation in Construction*, vol. 81, pp. 401–410, 2017.

