

LabFAST基于 Python 开发，采用了现代化的软件架构，结合了高性能计算（Numba JIT）和交互式图形界面（PySide6 + PyQtGraph）。它的目标是对标 OpenFAST 等专业软件，实现气动-水动-伺服-弹性（Aero-Hydro-Servo-Elastic）的耦合仿真。

以下是对该项目架构、组成部分及功能的详细解析：

## 1. 系统整体架构

该软件采用了经典的 MVC（模型-视图-控制器）变体架构，主要分为三层：

- **GUI / 视图层** (visualization/)：基于 PySide6，提供用户交互、参数配置、3D 实时数字孪生展示和数据波形监测。
- **求解器层** (solver/)：独立的工作线程（QThread），负责时间步进迭代，调度各个物理模块。
- **物理核心层** (physics/ & control/)：包含具体的数学模型（结构、气动、水动、环境），采用了 Numba 进行即时编译加速，以实现 Python 下的高性能数值计算。

## 2. 详细组成部分解析

### A. 入口与配置

- `main.py`：程序的启动入口。初始化 Qt 应用环境，设置样式，并启动主窗口。
- `config/nrel_5mw_params.py`：定义了 NREL 5MW 基准风机的完整参数（几何尺寸、质量分布、气动系数、环境默认值）。这是一个数据类，贯穿整个仿真流程。

### B. 物理引擎核心 (physics/) - 这是项目的核心

该部分实现了多物理场耦合，特点是大量使用了 `@njit(cache=True)` 进行加速。

#### 1. `structure.py` (结构动力学):

- **核心算法**: 使用 Kane 方法 (Kane's Method) 构建多体动力学方程。
- **自由度 (DOFs)**: 实现了 22 个自由度的模型，包括：
  - 平台刚体运动 (6 DOF: Surge, Sway, Heave, Roll, Pitch, Yaw)。
  - 塔筒柔性 (4 DOF: 前后/侧向的前两阶模态)。
  - 机舱与传动链 (3 DOF: 偏航、发电机方位角、传动链扭转)。
  - 叶片柔性 (9 DOF: 每个叶片 3 个模态 - 2 个挥舞 + 1 个摆振)。

- **功能:** 计算质量矩阵  $M$ 、阻尼矩阵  $C$ 、刚度矩阵  $K$ ，并求解状态导数  $\dot{y}$ 。

## 2. aerodynamics.py (空气动力学):

- **核心算法:** BEM (叶素动量理论)。
- **修正模型:** 包含 Prandtl 叶尖损失修正、Glauert/Buhl 感应因子修正。
- **性能:** 使用 Numba `calculate_blade_forces_jit` 将全叶片积分循环编译为机器码，大幅提升计算速度。
- **数据:** 内置了翼型极曲线数据 (Cl, Cd) 。

## 3. hydrodynamics.py (水动力学):

- **核心算法:** 基于 Morison 方程 的切片法 (Strip Theory)。
- **功能:** 计算波浪载荷 (惯性力 + 阻力) 和静水回复力。支持 Wheeler 拉伸修正。
- **混合模型:** 预留了与势流理论 (Potential Flow, 辐射阻尼/附加质量) 混合的接口。

## 4. mooring.py (系泊系统):

- **核心算法:** 准静态悬链线 (Quasi-static Catenary) 模型。
- **求解:** 使用 `scipy.optimize.root_scalar` 求解悬链线非线性方程，计算导缆孔处的回复力。支持多根系泊缆。

## 5. inflow.py (风场环境):

- **功能:** 生成风速场。
- **模式:**
  - 定常风 (Steady)。
  - 内部湍流 (Internal): 使用 Kaimal 谱的近似生成随机风。
  - **外部文件:** 支持读取 TurbSim ( `.bts` ) 二进制风场文件 (这是 V4.4 的重要修复功能) 。

## 6. seastate.py (海况环境):

- **功能:** 生成波浪运动学数据 (速度、加速度、波高) 。
- **模式:** 静水、规则波 (Airy)、不规则波 (JONSWAP 谱 / PM 谱叠加)。

- **海流**: 支持近表层和次表层海流剖面叠加。

### C. 控制系统 (control/)

- `controller_interface.py`: 实现了一个基础的控制器。
  - 目前逻辑较为简单: 恒定扭矩控制 (Region 3) 和基于风速的开环变桨控制 (Open Loop Pitch)。

### D. 求解器 (solver/)

- `worker.py`:
  - **积分器**: 实现了 Adams-Bashforth-Moulton 4 (ABM4) 预估-校正积分算法, 这是一种高精度的多步法, 适合刚性较强的动力学方程。启动前几步使用 RK4 (龙格库塔) 启动。
  - **多线程**: 继承自 `QThread`, 保证仿真计算不会卡死 UI 界面。

### E. 可视化与交互 (visualization/)

- `main_window.py`: 主界面容器, 管理 Dock 布局 (控制面板、示波器、3D视图)。
- `widgets/dock_3d.py`: **3D 数字孪生**.
  - 使用 OpenGL 绘制风机模型 (塔筒、机舱、叶片、平台、系泊缆)。
  - 根据仿真数据实时更新姿态 (仅映射 Pitch, Roll, Yaw)。
  - 绘制动态波浪表面。
- `widgets/dock_scope.py`: **实时示波器**.
  - 支持多通道数据实时绘图 (如风速、发电功率、平台运动)。
  - 支持数据导出 CSV。
- `widgets/dock_control.py`: 控制面板, 用于选择监测通道、设置仿真时长/步长。
- `dialog_env.py`: 环境配置对话框, 允许用户设置风速、波高、周期、海流参数等。

## 3. 目前实现的主要功能

1. **全耦合时域仿真**: 能够模拟 FOWT 在风、浪、流共同作用下的动态响应。
2. **高自由度建模**: 相比简单的刚体模型, V4.3/4.4 引入了塔筒和叶片的弹性自由度 (22 DOFs), 能捕捉结构的振动特性。

### 3. 环境模拟能力:

- 支持不规则波 (JONSWAP/PM) 。
- 支持读取专业的 TurbSim 风场文件。
- 支持复杂的垂直海流剖面。

### 4. 实时可视化:

- 3D 界面能同步显示风机的运动、波浪的起伏和系泊缆的形态。
- 示波器能实时显示数十种物理量 (载荷、运动、发电量等) 。

5. **高性能计算:** 核心气动和水动循环经过 Numba 优化, 能够在 Python 环境下达到接近编译语言的运行速度。

6. **数据交互:** 支持仿真数据的记录和导出 (CSV) , 支持通过 GUI 配置复杂的环境参数。