

基于虚拟现实技术的复杂海况起降交互平台设计

沈贝宁¹, 田永亮^{1*}, 张杜文², 桑腾蛟², 陶丽漁¹, 刘虎¹

¹北京航空航天大学航空科学与工程学院, 北京

²中国特种飞行器研究所水动力研究中心, 湖北 荆门

收稿日期: 2025年8月25日; 录用日期: 2025年12月18日; 发布日期: 2025年12月26日

摘要

水陆两栖飞机在执行海上任务过程中, 常面临高度复杂且充满不确定性的环境条件。恶劣的海况及波浪条件会显著增加飞机在起降阶段的操作难度与安全风险。针对这一问题, 文章基于虚拟现实技术, 提出了一种面向复杂海况的起降交互平台设计方法。该方法在水陆两栖飞机抗浪设计方案与机组人员操作测试评估之间, 构建了双向耦合的验证机制, 形成了“任务想定设置 - 人在环模拟验证 - 执行效果评估”的全流程仿真体系。该系统可根据实际需求灵活编辑任务想定, 开展人在环的半物理虚拟仿真试验, 从而实现设计方案与机组操作的耦合任务效能评估, 并在此基础上对复杂海况下的起降设计方案进行迭代优化。该方法有效提升了水陆两栖飞机在复杂海况中的起降适应性与安全性, 为海上起降运动的安全性评估提供了一种科学、可靠的虚拟飞行仿真手段。

关键词

水陆两栖飞机, 虚拟现实技术, 复杂海况, 仿真

Design of an Interactive Platform for Takeoff and Landing in Complex Sea States Based on Virtual Reality Technology

Beining Shen¹, Yongliang Tian^{1*}, Duwen Zhang², Tengjiao Sang², Liyun Tao¹, Hu Liu¹

¹School of Aeronautic Science and Engineering, Beihang University, Beijing

²Hydrodynamics Research Center, China Special Vehicle Research Institute, Jingmen Hubei

Received: August 25, 2025; accepted: December 18, 2025; published: December 26, 2025

*通讯作者。

Abstract

Amphibious aircraft frequently encounter highly complex and uncertain environments during maritime missions, where adverse sea states and wave conditions substantially increase the operational difficulty and safety risks during takeoff and landing phases. To address these challenges, this paper proposes a design methodology for an interactive platform for takeoff and landing in complex sea states, based on virtual reality technology. This approach establishes a bidirectional coupling verification mechanism between the wave-resistance design schemes of amphibious aircraft and crew operation testing and estimation, forming a complete simulation system of “mission scenario configuration, human-in-the-loop simulation verification, and operational performance estimation.” The system allows flexible editing of mission scenarios according to actual requirements and conducts human-in-the-loop semi-physical virtual simulation experiments to achieve coupled mission estimation of design schemes and crew operations. Subsequently, it enables iterative optimization of takeoff and landing design schemes in complex sea states. This approach effectively enhances the adaptability and safety of amphibious aircraft operations in challenging maritime environments and provides a scientific and reliable virtual flight simulation method for assessing the safety of takeoff and landing in complex sea states.

Keywords

Amphibious Aircraft, Virtual Reality Technology, Complex Sea State, Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

水陆两栖飞机是同时具备陆上和水面起降能力的固定翼飞机总称，常用于军事领域的海上侦察、护航、反潜、搜救，以及民用领域的森林灭火、物资运输等任务，在现代航空工业中具有重要地位[1]。20世纪50年代以来，尽管在世界范围内出现了日本US-2、俄罗斯BE-103、加拿大CL-415等著名水陆两栖机型，但水陆两栖飞机在市场规模和先进技术方面的发展势头与陆基飞机相比还是有所差距。

水陆两栖飞机发展受限的一个重要原因在于执行任务环境比较复杂，因此造成更高的事故率[2]。尤其是水面高速起降和长距离滑行，导致超过90%的水上事故发生在起降阶段[3]。此外，水陆两栖飞机的抗浪性是评价性能优劣的重要指标。在恶劣复杂的海况下完成起降任务的能力，决定了水陆两栖飞机适用的海域范围和出勤率。因此，水陆两栖飞机在复杂海况下的起降性能研究尤为重要[3]。目前日本的US-2可在五级海况、浪高3m的条件下安全起降，抗浪技术处于世界领先水平。近年来，国内研究者也进行了诸多研究，如起飞过程波浪运动响应[3]、起降飞行动力学仿真[4]、规则波水面降落的水动力学评估[5]、波浪干扰的加速滑行运动特性[6]等。

一般而言，水陆两栖飞机的水面起降性能研究通常会分为数学建模、仿真分析、水池试验、缩比机试验等多个阶段。在试飞之前，各阶段的研究均受到性能包线和误差范围约束。而在试飞过程中，机组人员的操作也是导致实际复杂海况起降事故的重要因素之一。若单纯依赖现实飞行试验来耦合评估水陆两栖飞机的抗浪设计方案与机组操作的任务效能，不仅会面临着高额的试验成本，同时也难以充分保障机组在恶劣海况条件下的试飞安全。

虚拟现实技术(Virtual Reality, VR)在水陆两栖飞机的抗浪设计方案与机组人员测试评估之间, 提供一种可互动的桥梁。通过将仿真模型及试验结果数据集成至虚拟现实场景中, 可使机组人员在沉浸式环境下开展 VR 测试, 并得到抗浪设计方案的人在环(Human-in-the-Loop)评估结果, 进而为设计方案的优化迭代提供支持。本文提出一种基于虚拟现实技术的交互平台设计方法, 旨在为水陆两栖飞机在复杂海况下的起降运动安全性评估提供一种可靠的虚拟飞行仿真方法。

2. 平台需求分析与总体设计

2.1. 平台需求分析

为实现水陆两栖飞机复杂海况起降运动的安全性评估, 解决虚拟水上环境建模、虚拟飞行仿真测试、复杂海况起降驾驶评估等问题, 交互平台可利用 VR 头盔、飞行摇杆与模拟座舱等交互设备实现运动状态解算与可视化展示, 并结合多级试验数据进行验证。复杂海况起降交互平台需要满足如下功能需求:

- 1) 虚拟起降任务开始前, 支持起降任务编辑及环境想定设置。通过任务参数和相关约束设置, 初步制定方案, 输出标准化起降任务方案文件并支持方案读取。
- 2) 虚拟起降任务进行中, 支持人在环驱动仿真验证。在人在环虚拟海上起降任务驾驶模拟中具备同步监控、可视化监测和状态预警功能, 配备硬件系统为任务提供支撑。
- 3) 虚拟起降任务结束后, 支持任务执行情况分析评估。通过分析全过程仿真数据, 结合任务想定数据和用户脑力负荷量化, 实现人在环任务分析评估。

2.2. 平台总体设计

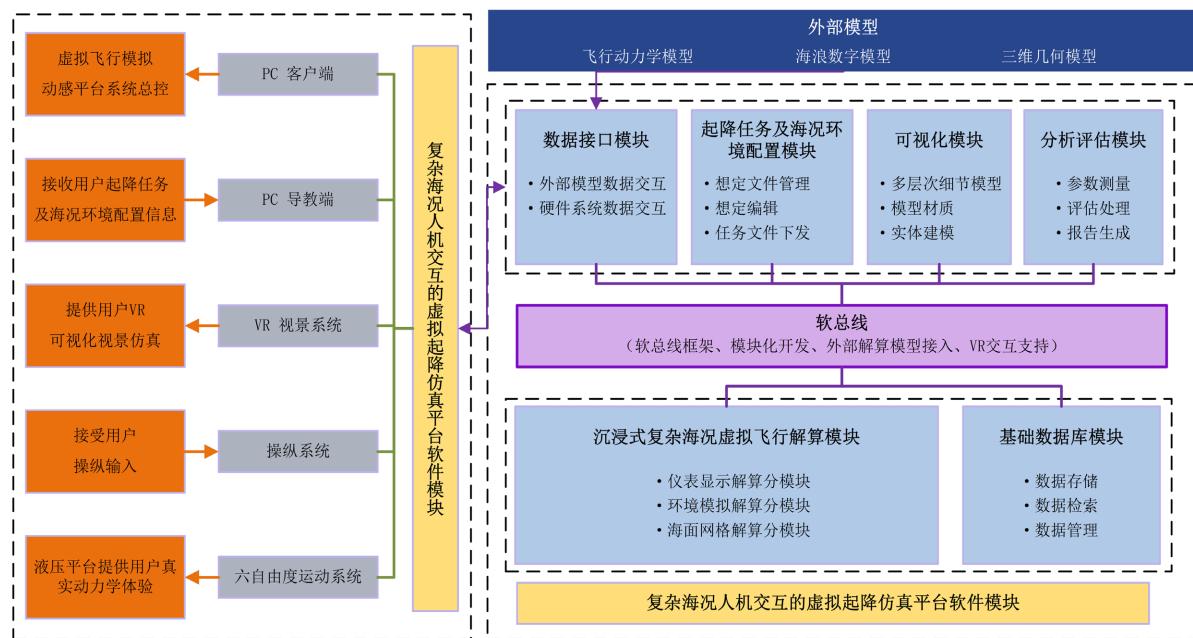


Figure 1. Diagram of the platform system design

图 1. 平台总体设计图

根据以上需求分析, 本文设计了由软件模块和硬件系统两部分组成的复杂海况人机交互的虚拟起降仿真平台(参见图 1)。其中, 软件模块面向基于虚拟现实的水面飞行器起飞着陆任务, 提供模块化开发与 VR 交互支持; 软件采用软总线技术实现各模块间的信息交互, 并设计数据接口模块用于实现与外部模型

和硬件系统的集成交互，具备环境配置、任务想定、仿真试验等功能；此外，软件还可以通过系统数据库实现数据储存、调用和管理。平台的硬件系统配置了人机交互接口，用于获取用户的驾驶操纵输入，并输出虚拟现实可视化效果和座舱六自由度运动，为复杂海况下的起降驾驶特性研究提供沉浸式仿真支持。

3. 平台软件模块

3.1. 软件模块架构

基于虚拟现实技术的复杂海况起降交互平台软件逻辑架构分为三层(参见图 2)：起降任务编辑及环境想定设置、人在环驱动仿真验证和任务执行情况分析评估。在各逻辑架构层中，与需求所对应，分别包含起降任务及海况环境配置模块、沉浸式复杂海况虚拟飞行解算模块、数据接口模块、基础数据库模块、分析评估模块和可视化模块。

此外，软件通过基础数据库模块进行全过程数据管理，并利用数据接口模块实现软件外部模型调用，提供硬件驱动信息，建立面向三层逻辑架构相应数据接口和数据库结构。

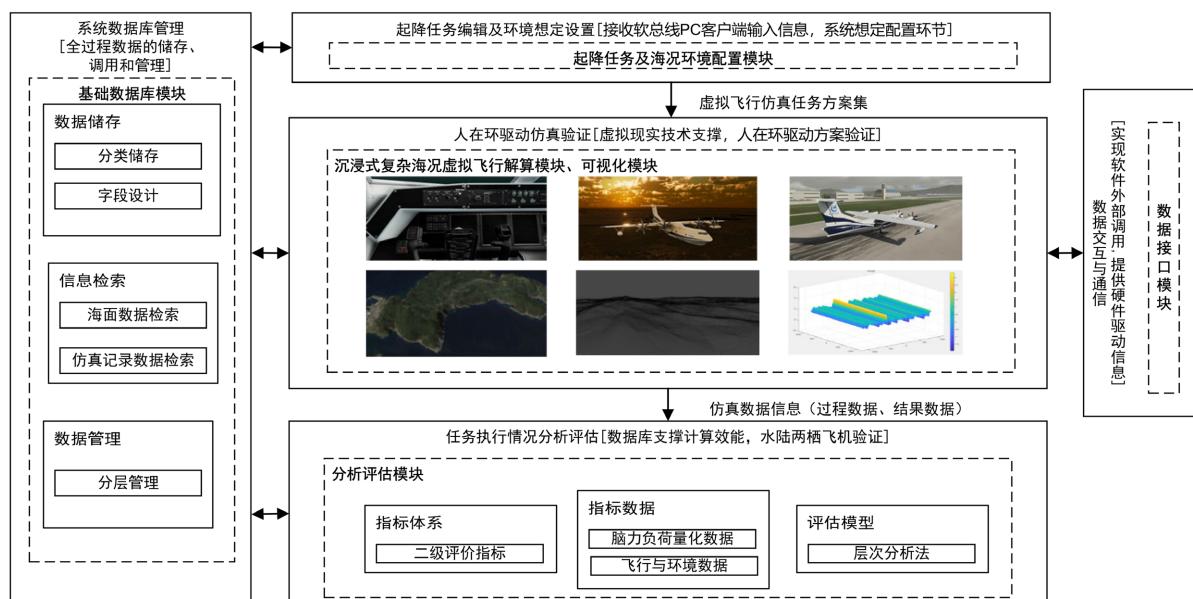


Figure 2. Diagram of the platform software module architecture

图 2. 平台软件模块架构图

软件架构对应的用户流程设计如下：

- 1) 用户使用基于起降任务及海况环境配置模块编辑想定，创建仿真任务场景，设置任务参数。模块根据编辑内容生成任务信息，包括任务目标、相关约束和资源配置，并下发任务方案。该层支持不同任务场景下的想定输入和同一任务想定下的多方案对比。
- 2) 沉浸式复杂海况虚拟飞行解算模块加载和编辑任务方案后，用户通过复杂海况人机交互的虚拟起降仿真平台硬件人在环执行任务，全过程实时数据通过总线接入模块解算，内容包括仪表显示、环境模拟、海面网格和飞机运动。沉浸式复杂海况虚拟飞行解算模块的解算结果通过可视化模块处理，生成驱动 VR 视景系统的数据，同时将任务仿真的数据传输给下一层。
- 3) 用户完成人在环任务操作后，在客户端填写脑力负荷评价表。分析评估模块内置双层指标体系，接收仿真数据信息，结合任务想定与场景设置数据和脑力负荷量化数据，对用户的仿真操作情况进行层

次分析评估, 从而验证飞行器针对复杂海况起降任务的有效性。

用户使用流程如图 3 所示。

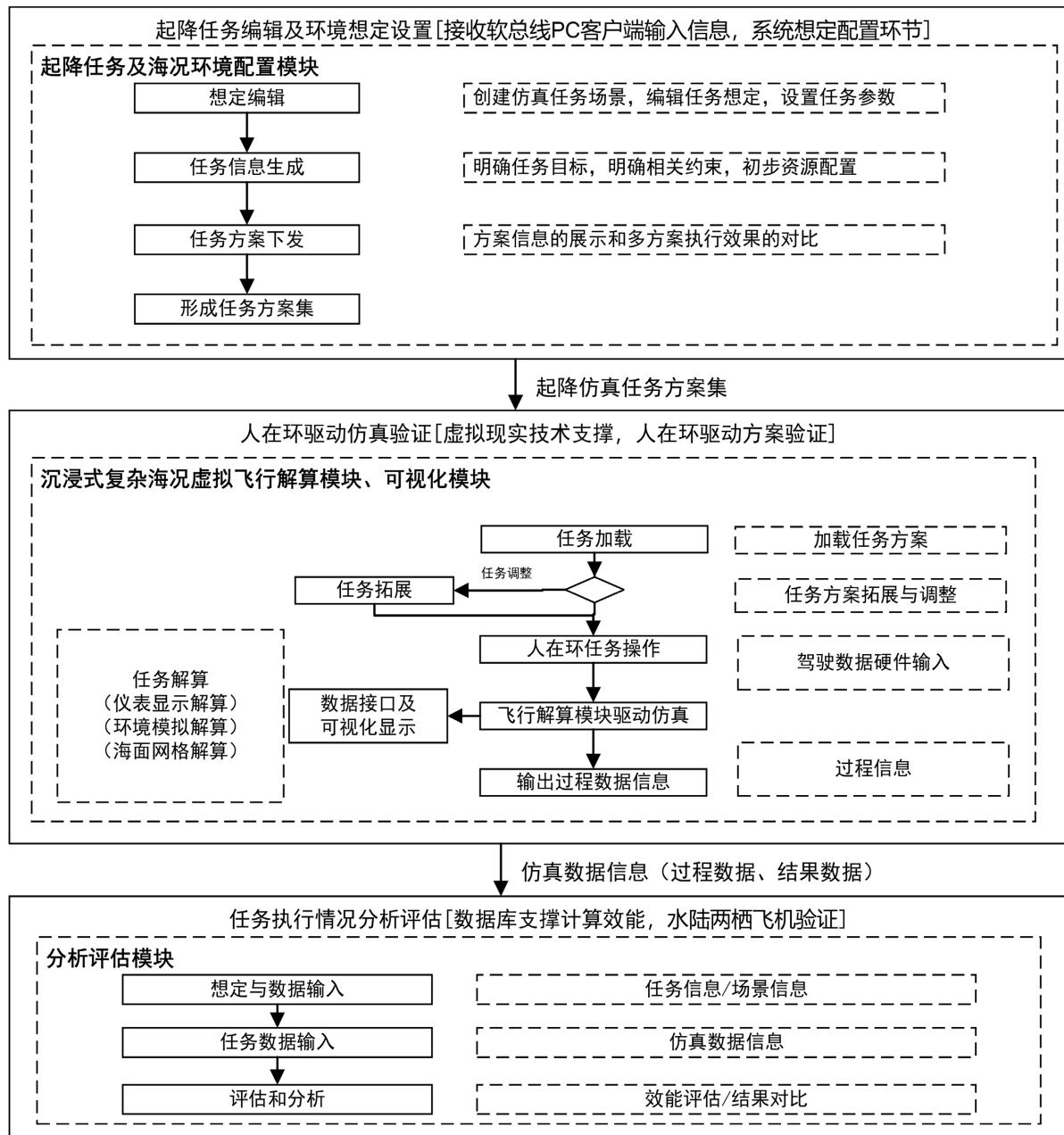


Figure 3. Diagram of the user operation flow

图 3. 用户使用流程图

3.2. 软件功能设计

1) 起降任务及海况环境配置模块

起降任务及海况环境配置模块具备想定文件管理、想定编辑与任务文件下发三个功能, 模块应用流程如图 4 所示。

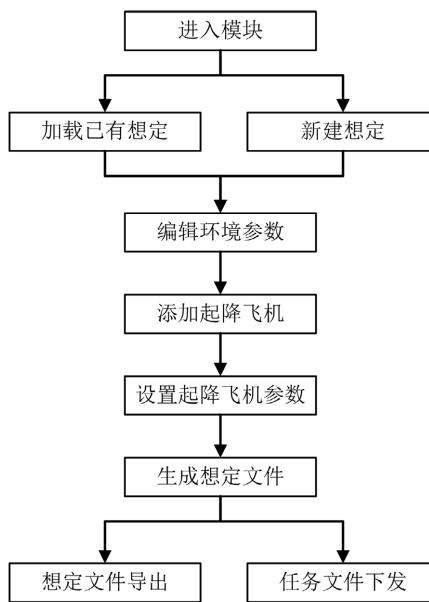


Figure 4. Diagram of the operation flow of the takeoff and landing task and sea state environment configuration module
图 4. 起降任务及海况环境配置模块应用流程图

想定管理功能用于新建、存储、导出想定文件，明确任务资源，以作为起降任务想定信息的输入，并用于方案制定及仿真过程的解算与可视化展示。想定编辑功能支持对海况及环境参数、起降飞机参数、任务初始参数的编辑与设置。任务文件下发功能主要完成相关起降任务下发，提供其他模块的数据输入。

2) 数据接口模块

数据接口模块用来实现复杂海况人机交互的虚拟起降仿真平台软件的数据交互与通信，包含外部模型数据接口和硬件系统数据接口，前者承接软件外部调用，后者供给硬件驱动信息。

外部模型数据接口由飞机动力学模型接口、海浪数学模型接口和三维几何模型接口组成。用户在获取几何、动力学、海浪等外部模型后，通过数据或文件接口使得软件顺利调用这些模型的信息。此外，硬件系统数据接口与硬件子系统对应设计，用以支持软件解算数据发送与硬件运行反馈的交互。

数据接口模块应用流程如图 5 所示。

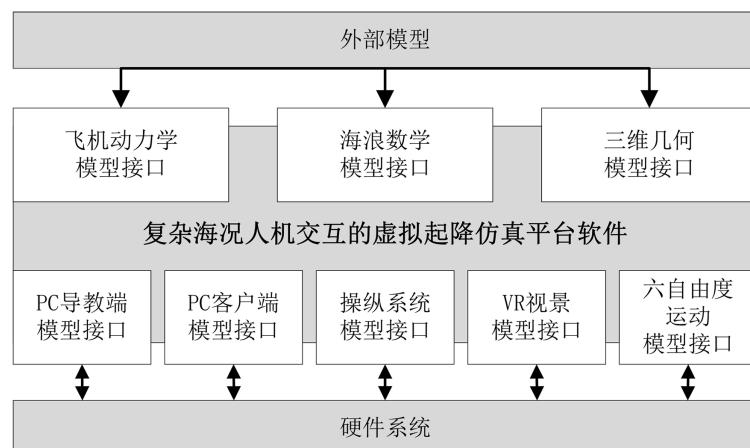


Figure 5. Diagram of the operation flow of the data interface module
图 5. 数据接口模块应用流程图

3) 沉浸式复杂海况虚拟飞行解算模块

沉浸式复杂海况虚拟飞行解算模块是平台的算法核心模块，主要包括飞行器仪表、飞行环境、海面网格等模拟解算功能。仪表显示解算支持 VR 视景中的姿态方向指示器、水平位置指示器、燃油油量表等仪表的数据显示；飞行环境解算包含大气散射、日地及地月关系、体积云等(参见图 6)；海面网格解算能够根据飞机起降的仿真或试验结果构造视觉 - 物理一体化海面网格(参见图 7)。



Figure 6. Visualization display of the effects of weather and time calculation
图 6. 天气与时间解算效果可视化展示



Figure 7. Visualization display of the effects of sea state level 4 calculation
图 7. 四级海况解算效果可视化展示

4) 基础数据库模块

单次模拟任务产生的数据量大，数据库模块将不同类型的数据按照单次试验进行分类保存，按照仿真进行的时间戳进行数据储存，为方便后续的分析处理，分类整理已有数据。

在数据储存方面，基础数据库模块对数据进行分类搭建，储存实验过程中的系统数据、过程数据、结果数据以及想定数据等，设计海洋网格数据库和仿真记录数据库。在数据检索方面，模块能够查找海面网格属性参数和设定参数、初始化模型信息、环境信息、模型信息等。在数据管理方面，模块支持客户端查询和创建任务，支持客户端运行过程中数据呈现，支持客户端查看运行数据和分析评估指标结果数据。

数据库架构设计如图 8 所示。

5) 分析评估模块

分析评估模块基于平台收集的数据，采用多维脑力负荷评价量表进行主观测量，结合模型库、数据库模块对水面飞行器所处状态进行数据采集与处理，采集环境信息中的海况环境、气象环境等数据进行整合、分析。建立评估指标体系，从人、机、环境三个角度进行定量分析与综合，对实验人员在特定情况下的综合任务安全性给出体系化评价。

6) 可视化模块

采用开发引擎 Unity 的渲染技术和物理特性, 解决场景构造、对象处理、场景渲染、事件处理、碰撞检测等问题, 实现计算可视化、计算机动画和虚拟现实可视化。

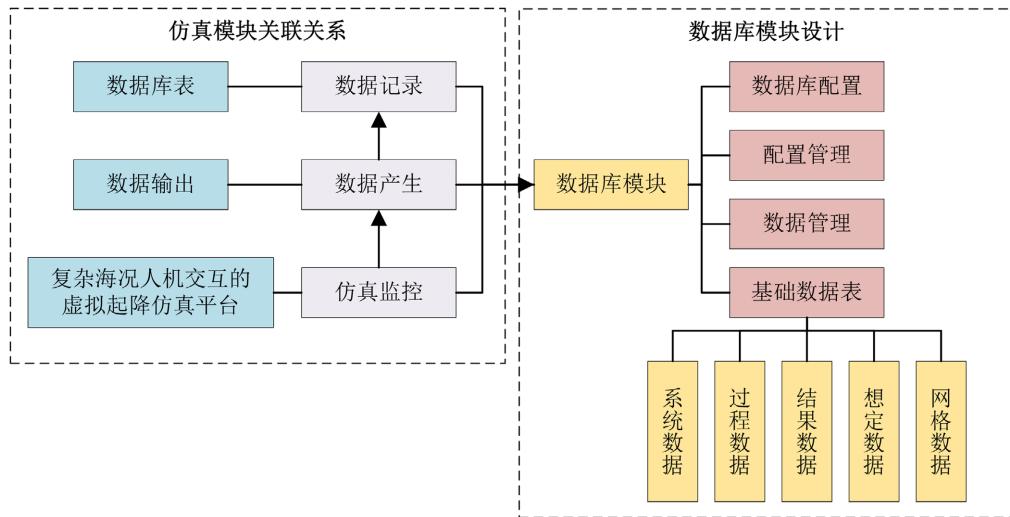


Figure 8. Diagram of the database architecture design
图 8. 数据库架构设计图

4. 平台硬件系统

复杂海况起降交互平台的硬件系统需要使用虚拟现实技术实现可视化功能, 在操纵杆接收用户输入信息的基础上, 外部加装液压驱动六自由度仿真运动平台, 实现海浪水交互的模拟, 兼备经济性、可行性和安全性, 满足双驾驶员机组的需求。硬件子系统组成如下:

1) PC 客户端

PC 客户端主要负责运行飞行模拟软件, 进行飞行动力学的实时计算; 提供用户界面, 展示飞行数据和状态; 与操纵系统和六自由度运动系统通信, 接收用户输入并发送控制命令。

2) PC 监控端

PC 监控端主要实现对机组飞行操作的实时监控和对飞行模拟进行控制, 包括暂停、重置等功能。PC 监控端能够接收 PC 客户端发送的飞行数据, 实现对飞行状态的实时监控和分析, 通过局域网与 PC 客户端连接, 保证数据传输的实时性和稳定性。

3) VR 视景子系统

VR 视景系统为用户提供沉浸式飞行视觉体验, 通过虚拟现实技术展示 360 度飞行视景, 实时响应用户的头部运动, 调整显示画面。配备高分辨率 VR 头显和定位传感器, 确保视景的清晰度和运动追踪的准确性。与 PC 客户端紧密集成, 确保视景的实时性和飞行状态的同步。

4) 操纵子系统

操纵系统主要接收驾驶员的直接操作输入, 转化为电子信号以便进行进一步的处理和响应。

中央操纵杆捕捉驾驶员对飞机横向和纵向控制的输入。设置人体工学握把, 配备多个按钮和开关, 将飞行员的物理操作转换为电子信号, 传递给仿真系统进行解算。

节流阀弧座接收驾驶员对飞机推力的控制输入。可以精确调节, 模拟真实飞机的推力控制, 其操作同样被转换为电子信号传入系统。

方向舵踏板捕捉驾驶员对飞机偏航运动的控制输入。采用阻尼设计，模拟真实飞机踏板的阻力和反馈，增强驾驶员的操作体验。

5) 六自由度运动子系统

六自由度运动子系统为飞行模拟提供物理运动反馈，包含六自由度运动平台和模拟座舱。六自由度运动平台通过液压或电动机构提供飞行过程中的物理运动反馈，结构稳固，可靠性高，能精确响应飞行仿真系统的控制信号，模拟飞行器在空中的实际运动状态，包括滚转、俯仰和偏航等。模拟座舱提供飞行座舱环境，安装飞行操控设备，支撑六自由度运动平台，确保设备与座舱同步运动。

5. 结论

1) 本文基于虚拟现实技术设计了一种用于复杂海况起降的人机交互仿真平台。该平台承担了水陆两栖飞机的抗浪设计方案与机组人员测试评估之间的桥接作用，构建了具有“任务想定设置 - 人在环模拟验证 - 执行情况评估”全流程的仿真系统；

2) 本文主要从平台总体架构和软硬件集成设计的角度，对水陆两栖飞机抗浪性研究手段进行了初步探索。而在多平台融合性、验证数据标准化等方面仍面临诸多挑战，后续需进一步开展深入研究。

参考文献

- [1] 黄领才, 雍明培. 水陆两栖飞机的关键技术和产业应用前景[J]. 航空学报, 2019, 40(1): 18-34.
- [2] 卢昱锦, 肖天航, 邓双厚, 等. 着水初始条件对水陆两栖飞机着水性能的影响[J]. 航空学报, 2021, 42(7): 159-170.
- [3] 黄森, 褚林塘, 李成华, 等. 大型水陆两栖飞机抗浪能力研究[J]. 航空学报, 2019, 40(1): 121-129.
- [4] 王峥华, 段旭鹏, 程志航, 等. 船身式水陆两栖飞机起降飞行仿真研究[J]. 航空工程进展, 2021, 12(1): 72-78+90.
- [5] 文学良, 屈秋林, 刘沛清. 水陆两栖飞机波浪降落性能工程算法研究[C]//中国力学学会流体力学专业委员会. 第十一届全国流体力学学术会议论文摘要集. 2020: 457.
- [6] 胡开业, 石林飞, 周辉, 等. 基于计算流体动力学方法的两栖飞机规则波中运动特性研究[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2024, 45(1): 44-52.