

水上飞机滑行稳定性影响因素及动力学模型构建研究

乔轩宇 高 婷

沈阳航空航天大学 辽宁沈阳 110136

摘要: 水上飞机作为一种兼具航空与航行特性的特殊飞行器,广泛应用于应急救援、岛屿补给、旅游运输等领域,其滑行稳定性是影响其起降性能与飞行安全的关键因素。近年来,随着我国海洋民用事业的快速发展,水上飞机的研发与应用需求不断上升。本文围绕水上飞机滑行阶段的稳定性问题,系统分析了影响其稳定性的主要因素,并尝试构建相应的动力学模型,从理论与实践层面提升对其滑行性能的认知。文章采用文献综述、案例分析与数理建模相结合的方法,深入剖析海况、船体结构、重心布置、推进系统等要素对滑行稳定性的作用机理,并提出一种考虑水面扰动与非线性运动特征的动力学模型框架。研究结果可为水上飞机的设计优化与适航性评估提供理论支撑,也为未来相关仿真系统的开发奠定基础。

关键词: 水上飞机; 滑行稳定性; 影响因素; 动力学模型; 海况干扰

引言

水上飞机具备在水面起降的能力,广泛应用于应急救援、海岛运输与水上巡逻等领域,具有陆基飞机无法替代的优势。然而,水上滑行阶段所受扰动显著,其稳定性直接影响起飞安全和任务执行效果。相比陆上跑道,水面环境更加复杂,风浪、波高、流体作用等因素交织叠加,对飞机结构设计与运动控制提出更高要求。

近年来,随着我国海洋经济发展提速,水上飞机的应用需求持续增长。深入研究其滑行过程的受力特性与动力学行为,构建科学的建模体系,已成为提升其安全性与适航性能的关键。本文将系统分析滑行稳定性影响因素,探讨建模理论与技术路径,提出动力学模型构建方法,为水上飞机滑行性能仿真与优化控制提供理论支撑与工程参考。

一、水上飞机滑行稳定性的关键影响因素

1. 复杂海况对滑行过程的动态干扰机制

水上飞机滑行阶段的稳定性面临着极其复杂的外部环境挑战,尤其是来自自然海况的干扰。水面风浪条件并非恒定不变,不同时间段、不同区域的水面状态均可能产生剧烈差异。例如,波浪周期、波高、波斜率等物理参数的变化,都会直接影响水上飞机的受力状态与姿态保持能力。特别是在波浪周期与机体滑行频率产生耦合时,极易引发结构共振现象,使滑行稳定性显著下降。此类非线性扰动不仅削弱飞行员的操控信心,也大大增

加了起飞失败的概率。

近年来,中国海洋事业在民用领域发展迅速,由于水上飞机具有与陆基飞机不同的特点,即其水面起降的能力,可以满足应急救援和军事领域的特殊需求,因此中国对于水上飞机的开发研制需求日益迫切。在这种背景下,海况对滑行性能的影响研究成为重要议题。较强海浪会导致水上飞机在滑行阶段产生上下颠簸与横向不稳,这种复合扰动不仅会改变迎角,干扰升力生成,还可能使浮筒或船体与水面产生异常碰撞,危及飞行安全。因此,在模型构建与设计阶段,需将海况扰动作为动态变量纳入滑行系统的响应模型,并结合不同风浪等级进行多情景仿真评估,以保证飞机在实际水面环境中的适应性与稳定性。

2. 结构与动力系统的匹配性对滑行稳定性的内在影响

除了外部水动力扰动,水上飞机滑行稳定性的另一个核心影响因素在于其结构设计与动力系统之间的匹配性。水上飞机在滑行过程中需同时满足高推力输出与稳定姿态控制的双重要求,这就对船体的水动力线形、浮筒位置、重心布局和推进装置安装角度提出了极高的协调性要求。水上飞机具有在水面上稳定滑行的能力是其最为典型的特征,在性能上要求其具备优良的动力性能,以及良好的运动稳定性等。当前工程中常见的设计失衡现象包括:重心偏后引发仰头、偏航推力不对称导致方向偏移、机翼与船体连接点刚性不足造成滑行姿态震荡等,这些问题都会降低飞机在加速滑行过程中的稳定性。

在整体设计中，动力装置的推力矢量必须与机体质心位置高度协调。采用单发或双发配置时，需特别注意发动机推力轴线与重心轴线的夹角，避免由于推力偏移引发不对称加速。复杂的海况对水上飞机的适航性和安全性提出了更高的要求。若再叠加外部波浪扰动，任何微小的结构设计缺陷都可能在滑行中被放大，引发剧烈的非线性响应。此外，船体水动力布局的优化也是确保稳定滑行的重要手段，例如通过改善主船体底面曲率、调整浮筒位置与角度来优化水阻分布。水上飞机能够在水面高效起降得益于船体布局的精细化设计，而深入掌握水上飞机的水面起飞滑行规律对于飞机的研制至关重要。因此，提升滑行稳定性必须立足于“动力—结构—流体”三者的系统性耦合分析，避免孤立优化导致系统性失稳。

二、典型影响因素的物理机制分析与工程对策

1. 水动力特性对滑行响应的具体作用机理

水上飞机在滑行状态下受到的水动力远比普通船舶复杂。由于其滑行速度远高于一般船只，迎水面与水动力之间产生的附加质量效应和非定常流体作用极为显著。机体与水面的接触在滑行初期属于半浮状态，此时水动力以非线性方式迅速变化，会导致升沉（垂直上下运动）和俯仰（前后角度波动）的剧烈波动。如果设计中未能精确评估这一阶段的水阻系数及其变化趋势，极易出现“首尾上下跳动”现象，从而引起滑行姿态的不稳定。

此外，随着滑行速度增加，流体分离点不断后移，波浪阻力逐渐成为主导影响项。尤其在机体与水面接触点发生偏移时，会导致受力中心偏移，引发纵向力矩突变，使滑行过程出现异常震荡，甚至影响起飞稳定性。工程上通常通过在船体底部增加纵向流线设计、添加防撞波纹结构、使用复合材料降低自重等手段来减缓流体干扰。也有设计者选择采用喷气式减阻技术，在滑行底面注入气流层以减弱水面剪切作用，从而提升滑行效率与稳定性。这些水动力方面的调整均基于深入理解其物理机制的前提之上进行。

2. 重心与姿态调控系统的稳定性保障作用

重心控制系统对水上飞机的滑行稳定性具有决定性影响。滑行过程中，飞机的俯仰角与姿态稳定性高度依赖于重心位置是否合理布设。若重心过前，可能导致机头在加速时持续下沉，增加水阻系数；反之若重心过后，则可能引发“仰头效应”，既不利于滑行加速，又会影响力分布。此类重心失衡现象若未及时通过姿态控制系

统予以干预，将对滑行路径造成偏差，严重时甚至会影响起飞抬头角，引发滑行失败。因此，设计阶段需精确设定主油箱位置、货舱配重结构与操纵舵面联动关系，确保各阶段重心稳定可控。

为了提高滑行过程中的稳定性，现代水上飞机普遍引入自动姿态调控技术。该系统通过传感器实时采集俯仰角、加速度与姿态变化等数据，借助伺服控制机制调节尾翼或配重位置，实现实时姿态修正。部分先进机型还引入智能飞控系统，通过算法预测滑行过程中可能发生的非线性失稳状态并提前调整操控策略。这种技术在海况变化剧烈的条件下尤其重要，可以显著提升水上滑行的抗扰性能与安全裕度。从工程实证看，带有动态重心调节功能的机型在滑行加速阶段的稳定性较传统结构有明显提升，尤其在应对侧浪、突发涌浪等突发干扰时表现更加稳定。

三、水上飞机滑行动力学模型的构建路径

1. 模型建立的理论要素与建模假设条件

构建水上飞机滑行阶段的动力学模型，必须建立在空气动力学、水动力学与刚体运动控制理论的交叉基础之上。由于水上飞机在滑行时处于“气—水—结构”三重作用系统中，因此其运动状态的建模不能简单套用传统陆基飞机模型，而应结合滑行过程中“浮力—重力—推进力—水动力”的变化进行六自由度动力学建模，全面描述机体在三个线性方向（纵向、横向、垂直）和三个旋转方向（俯仰、偏航、滚转）上的加速度与角速度响应。建模过程中通常引入牛顿—欧拉方程组，通过质量、惯量、力矩平衡等公式表达滑行状态下飞机的动力学行为。

滑行建模还必须引入多个关键变量，包括机体质量、重心位置、迎角变化、波浪频率、水面剪切力、推进矢量方向等。尤其在复杂海况下，波高与波长对水动力附加质量与阻力系数有显著影响，这些因素不容忽略。为了保证建模精度，研究者往往通过CFD仿真、水池试验或风洞数据反向拟合参数。同时，需要在建模过程中考虑到水动力系数的非定常变化，不能采用恒定阻力模型简化处理。在起滑、加速、滑跑三个阶段，不同物理力的主导效应不同，模型应设定动态权重函数或切换逻辑，以更真实地还原滑行状态演变。

2. 滑行动力学方程体系构建与变量设定方式

完整的滑行动力学模型方程组需基于惯性坐标系与机体坐标系之间的变换关系构建。滑行初期，机体主要受到浮力、水面正压力及部分推进力影响，此阶段应以

重心稳定性为建模重点；随着速度提升，气动升力增强、水阻减弱，系统转入复合驱动状态，需在模型中引入非线性升力项与流体激振扰动项。在垂直方向上建模浮沉与俯仰，在水平面建模前进速度与偏航角变化，并加入波浪扰动模拟模块，使模型具有复杂海况适应能力。最终形成一套含有时变参数、交叉耦合项及环境激励输入的高维非线性微分方程组。

为解决模型的求解复杂性，常采用模块化建模思路：将滑行过程分为水动力模块、气动力模块、推进力模块、姿态调控模块，并通过系统接口实现数据耦合。这种方法不仅便于调试各子模块，还可为后续嵌入式控制系统开发与实时仿真打下基础。在部分研究中，已将此类模型部署于Simulink平台，与真实水上飞机的飞控系统联合运行，用于测试抗干扰能力与滑行稳定性。未来，模型还可结合深度学习进行参数修正，使其具有自学习能力，进一步提高对复杂环境的适应能力与滑行状态预测准确性。

四、动力学模型的应用前景与优化策略展望

1. 模型在工程仿真与适航性评估中的应用价值

水上飞机滑行动力学模型是理论研究基础工具，亦是工程实践关键支撑。研发初期，可预测船体结构、发动机布局、水动力特性等参数变动响应，大幅减试飞、降成本；设计中，能模拟不同海况滑行稳定性，辅助选优船体线型与控制策略，如叠加波浪扰动函数评估二/四级海况稳定性差异，为极端工况结构强化提供理论支撑。按民航适航要求，模型可仿真滑行升沉、俯仰、偏航角等指标，生成审定数据；还能联动飞控测试算法，确保控制指令响应准确，提升整机安全性与可靠性。

2. 模型精度提升与智能控制耦合的未来路径

滑行动力学模型虽有基本应用能力，但精度与适应性不足。其一，水动力参数获取依赖实验或经验公式，受测试条件多变限制，致高海况下仿真结果与实际偏差。为提精度，未来需引入CFD与实验水槽数据融合技术，实现波浪激励、流场变化、水面剪切力等细节高精度建模；同时，采用深度学习或机器学习算法进行模型参数回归亦可，经海量滑行试验数据分析训练，模型可实现自适应参数修正与动态优化，显著提升预测能力。

其次，随智能化控制系统发展，动力学模型需与飞行控制系统深度耦合，实现“模型—控制—飞行”一体化闭环优化。例如，基于模型预测控制（MPC），系统可依实时姿态预测滑行趋势，预先调节舵面或发动机推力，规避非稳定状态。此外，模型可嵌入智能仿真平台，与VR/AR系统融合，为飞行员提供直观训练场景，尤适用于新型教练型水上飞机。最终目标为构建高鲁棒性、自学习、强适应性的水面滑行预测控制体系，确保水上飞机在复杂自然环境下保持优异稳定性与控制性。

结论

水上飞机作为融合航空与航海特性的高技术装备，其滑行稳定性直接决定了起降效率与飞行安全。本文系统分析了影响水上滑行稳定性的主要因素，涵盖海况扰动、水动力特性、结构布局与重心控制等关键维度，并在此基础上构建了适应复杂水面环境的动力学模型体系。研究指出，深入掌握滑行阶段的力学规律与运动响应机制，不仅有助于提升设计精度与控制策略的科学性，也为我国水上飞机的适航性评估与飞控系统优化提供了理论支撑。未来，应在模型精度提升与智能控制融合方向上持续推进，实现从工程试验到仿真决策的全面智能化升级，推动我国水上航空事业高质量发展。

参考文献

- [1] 王心怡, 陈吉昌, 付晓琴, 等. 水上飞机不同滑行速度下的动态响应特性研究[J]. 航空计算技术, 2024, 54(02): 20-25.
- [2] 邱柯朝. 水上飞机双浮筒水面滑行过程数值模拟研究[D]. 哈尔滨工业大学, 2023. DOI: 10.27061/d.cnki.ghgdu.2023.001997.
- [3] 伍峰, 谢超, 印正锋. 某型飞机起落架收放系统转换活门故障分析与改进设计[J]. 液压气动与密封, 2022, 42(02): 50-52.
- [4] 段旭鹏. 水上飞机水面滑行起降的数值模拟[D]. 西北工业大学, 2020. DOI: 10.27406/d.cnki.gxbgu.2020.000468.
- [5] 郝超, 吴行. 水上飞机镜面水起降操纵策略研究[J]. 中国科技信息, 2019, (06): 49-51.