

飞行模拟器运动平台关键技术综述

赵大海¹, 孙环宇¹, 宗宁², 郭晓强²

(1. 中国航空工业集团公司沈阳飞机设计研究所, 沈阳 110035)

(2. 河北工业大学 机械工程学院, 天津 300401)

摘要: 飞行模拟器运动平台作为飞行训练核心装备,其运动性能与力学特性直接影响飞行员训练效果与沉浸感。现有研究多聚焦单一技术领域,缺乏贯通结构设计、驱动控制与生理感知的系统性整合。本文围绕运动平台结构构型与驱动技术、运动学与动力学建模、鲁棒与智能控制、运动逼真度与生理感知模拟等关键技术,系统梳理国内外研究进展,比较不同构型与驱动方式的适用边界,分析当前在运动空间、动态响应与稳定性、洗出算法参数整定及多通道感知耦合等方面存在的问题,并展望冗余驱动与串并联混合构型、刚柔耦合动力学建模、多模态生理感知协同控制等发展方向,为高等级飞行模拟器运动平台的自主创新与技术突破提供理论参考。

关键词: 飞行模拟器运动平台; 动力学建模; 运动控制; 生理感知; 逼真度评估

中图分类号: V216.7

文献标识码: A

Review of key technologies for flight simulator motion platforms

ZHAO Dahai¹, SUN Huanyu¹, ZONG Ning², GUO Xiaoqiang²

(1. AVIC Shenyang Aircraft Design and Research Institute, Shenyang 110035, China)

(2. School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China)

Abstract: The flight simulator motion platform serves as a core piece of equipment for flight training. Its motion performance and mechanical properties directly influence pilot training effectiveness and immersion. Existing studies have mostly focused on a single technical domain. They lack a systematic integration of structural design, actuation control, and physiological perception. This review covers key technologies for the motion platform. These technologies include structural configuration and actuation, kinematic and dynamic modeling, robust and intelligent control, and motion fidelity and physiological perception simulation. Domestic and international research progress is systematically reviewed. Different configurations and actuation methods are compared in terms of their applicable boundaries. Current problems are analyzed, including motion workspace, dynamic response and stability, washout algorithm parameter tuning, and multi-channel perceptual coupling. Future directions are also outlined. These directions include redundant actuation, series - parallel hybrid configurations, rigid - flexible coupling dynamic modeling, and multimodal physiological perception-based cooperative control. This review aims to provide a theoretical reference for independent innovation and technological breakthroughs in high-level flight simulator motion platforms.

Key words: flight simulator motion platform; dynamic modeling; motion control; physiological perception; fidelity evaluation

收稿日期: 2026-06-11; 修回日期: 2026-09-11

基金项目: 国家自然科学基金(12472009); 河北省青年科学基金(E2025202002); 河北省高等院校科学研究项目(JCZX2025001); 中国博士后自然科学基金(2024M750718); 河北省燕赵黄金台聚才计划骨干人才项目(博士后平台)(B2024005002); 四川省科技计划资助(2025YFHZ0285, 2026YFHZ0097); 上海交通大学海洋工程全国重点实验室开放基金(2458)

通信作者: 郭晓强(1991—), 男, 博士, 教授。E-mail: 786526101@qq.com

引用格式: 赵大海, 孙环宇, 宗宁, 等. 飞行模拟器运动平台关键技术综述[J]. 航空工程进展.

ZHAO Dahai, SUN Huanyu, ZONG Ning, et al. Review of key technologies for flight simulator motion platforms[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering. (in Chinese)

0 引言

航空事业的快速发展以及民用航空、无人机、通用航空等领域的持续扩张,对飞行员培养与技能训练的需求显著增长^[1]。波音公司预测,2025—2044年中国需新增飞行员12.4万名^[2]。然而,实际飞行训练受制于成本高昂、风险管控困难等因素,难以在真实环境中重复模拟极端飞行条件与应急工况,因而亟需一种兼具安全性、经济性与高效性的替代训练方案。在此背景下,飞行模拟器应运而生。作为一类能够在地面复现飞行器飞行状态、模拟空中环境并可供人操纵的仿真装置,飞行模拟器可为飞行员提供逼真的操纵负荷及视觉、听觉、运动等多维度感知反馈。相较于使用真实飞行器开展驾驶员培训与飞行试验,飞行模拟器展现出安全性高、经济性好、无污染等显著优势,已逐步成为航空训练体系中的核心装备^[3-6]。作为飞行模拟器的关键执行机构,运动平台通过复现飞行器六自由度运动及相应的力学感知,为飞行员构建高沉浸感的训练环境。其动态响应性能与运动感知逼真度直接决定模拟训练效能,是衡量模拟器等级的核心技术指标^[7-8]。

回顾飞行模拟器运动平台的研究历程,其研究主要经历了3个主要阶段:早期以液压驱动为主、聚焦于机构实现与运动学建模的结构设计阶段^[8-10];中期以控制算法优化为核心、重点关注动力学建模与精度提升的控制理论阶段^[11-13];当前则致力于智能化控制与生理感知集成的系统综合阶段^[3]。近年来,计算机图形学、虚拟现实、人机工程学及运动控制算法等前沿技术的交叉融合,显著提升了平台的综合性能与逼真度。然而,现有研究与实践表明,平台在运动空间受限、动态响应与稳定性矛盾、洗出算法参数整定、多通道感知耦合及经济性约束等方面仍存在亟待突破的技术瓶颈^[14-15]。上述问题相互耦合,共同制约着高等级飞行模拟器的自主研发进程,进而影响飞行训练的质量与效率。

目前,针对飞行模拟器运动平台的已有研究多聚焦于单一技术领域,或侧重于结构优化,或专注于算法改进^[16],或致力于人因评估^[17],缺乏贯通结构设计、驱动控制与生理感知的纵向技术脉络的系统性整合与评述。为此,本文系统梳理飞行模拟器运动平台在结构构型设计、驱动方式、控制

技术、运动学与动力学建模、逼真度提升与生理感知模拟等方面的研究进展,辨析现有成果的优势与不足,并在此基础上指出未来重点研究方向,以期为该领域的技术突破与自主创新提供理论参考。

1 运动平台结构与驱动技术

运动平台结构与驱动技术,是指通过合理的机械构型与驱动系统配置,使运动平台精准复现飞行器姿态变化与力学感知的技术方法。在飞行模拟器高逼真度训练需求驱动下,平台需满足大行程、高动态、高精度等多重要求,结构刚度与驱动响应的匹配、运动空间与承载能力的平衡、成本与性能的协同等关键问题均可能制约平台的整体性能。基于此,本节从结构构型设计、典型驱动系统及协同优化方法3个方面,系统梳理相关的研究进展。

1.1 结构构型设计

1.1.1 自由度配置

运动平台的结构构型设计围绕自由度配置、并联机构创新展开,其中自由度配置是构型设计的核心基础,直接决定平台的运动能力边界与工程适配场景。基于机构自由度数目与运动输出特性,可将飞行模拟器运动平台分为二自由度(2-DOF)、三自由度(3-DOF)、四自由度(4-DOF)和六自由度(6-DOF)四大构型体系,不同的构型运动学正/逆解、工作空间拓扑、刚度矩阵分布与动力学响应特性存在本质差异^[11]。其中,2-DOF平台通常采用2R构型,主要输出俯仰与滚转;3-DOF平台常见1T2R构型,仅增加一个独立平移通道;4-DOF平台多采用1T3R或2T2R构型,可在姿态模拟基础上增加有限平移;6-DOF Stewart平台则采用3T3R构型,具备完整的X、Y、Z三轴平移以及俯仰、滚转和偏航三轴转动能力。因此,2~4自由度平台本质上更适用于以姿态角和短时运动线索为主的训练场景,而6自由度平台才具备完整的三维空间位移复现能力。以构型分类为基础,早期研究主要围绕自由度配置与基础机构的运动学理论展开。国外,Gosselin等^[18]较早开展了3支腿6-DOF并联平台的工作空间拓扑分析与构型优化设计,奠定了少支链Stewart平台的机构学

设计基础;国内相关研究起步于20世纪末,王洪瑞^[19]针对液压驱动6-DOF并联机器人开展了运动解耦控制研究,为我国液压式飞行模拟平台的早

期构型选型与动力学设计奠定了理论基础。四类核心构型的关键性能指标对比如表1所示。

表1 不同自由度运动平台核心技术指标对比

Table 1 Comparison of core technical indicators for motion platforms with different degrees of freedom

自由度	二自由度	三自由度	四自由度	六自由度
常见自由度组成	2R	1T2R	1T3R 或 2T2R	3T3R
平移能力	无主动平移;仅由转动产生小幅耦合位移	通常仅具单轴平移,多为升降方向;不具完整三维平移	具1~2个有限平移方向;不具完整三维平移	具X/Y/Z三轴独立平移,可复现完整空间位移
旋转能力	俯仰+滚转	通常为俯仰+滚转,第三自由度用于平移	常见俯仰+滚转+偏航,或按任务配置2个旋转自由度	俯仰+滚转+偏航三轴独立转动
行程范围	旋转:俯仰 $\pm 12^\circ \sim \pm 15^\circ$,滚转 $\pm 18^\circ \sim \pm 20^\circ$	平移:升降 $\pm 200 \sim \pm 400$ mm,旋转:俯仰/滚转 $\pm 20^\circ \sim \pm 25^\circ$	平移:升降 $\pm 300 \sim 500$ mm,旋转:俯仰/滚转 $\pm 20^\circ \sim \pm 40^\circ$,偏航 $\pm 20^\circ \sim \pm 25^\circ$	平移:X/Y轴 $\pm 350 \sim \pm 450$ mm,Z轴 $\pm 300 \sim \pm 350$ mm,旋转:俯仰/滚转 $\pm 24^\circ \sim \pm 26^\circ$,偏航 $\pm 26^\circ \sim \pm 30^\circ$
运动速度	旋转:俯仰 $\leq 25^\circ/\text{s} \sim \leq 30^\circ/\text{s}$,滚转 $\leq 30^\circ/\text{s} \sim \leq 35^\circ/\text{s}$	平移: ≤ 0.5 m/s ~ 0.8 m/s,旋转: $\leq 30^\circ/\text{s} \sim 40^\circ/\text{s}$	平移: ≤ 0.6 m/s ~ 0.7 m/s,旋转: $30^\circ/\text{s} \sim 40^\circ/\text{s}$	平移: ≤ 1.0 m/s ~ 1.3 m/s,旋转: $\leq 45^\circ/\text{s} \sim 55^\circ/\text{s}$
加速度	旋转:俯仰 $\leq 40^\circ/\text{s}^2 \sim \leq 50^\circ/\text{s}^2$,滚转 $\leq 50^\circ/\text{s}^2 \sim \leq 60^\circ/\text{s}^2$	平移: ≤ 1 g ~ 1.5 g,旋转: $\leq 50^\circ/\text{s}^2 \sim 80^\circ/\text{s}^2$	平移: ≤ 0.6 g ~ 1.0 g,旋转: $\leq 30^\circ/\text{s}^2 \sim 60^\circ/\text{s}^2$	平移: ≤ 0.9 g ~ 1.2 g,旋转: $\leq 180^\circ/\text{s}^2 \sim 220^\circ/\text{s}^2$
典型应用场景	通用飞机基础驾驶、航空科普体验、低成本无人机地面模拟	轻型直升机基础训练、民航客机入门实训、运输机起降专项	民航客机基础综合训练、中型直升机全姿态实操训练	民航客机全动模拟机、战斗机高机动模拟器、舰载机起降专项装备

注:T表示平移自由度,R表示旋转自由度。

针对2-DOF运动平台,现有研究主要聚焦于机构—控制协同优化以提升大姿态角下的位姿跟踪精度。尹航等^[20]针对2-DOF飞行姿态模拟器设计了参数自整定控制器,实现了宽工况范围内的高精度位姿复现;任立伟等^[21]提出了基于模糊强化学习的自适应控制策略,有效抑制了参数时变与外载荷扰动对跟踪精度的影响,为少自由度平台的结构—控制一体化设计提供了理论基础;Abro等^[22]针对欠驱动2-DOF直升机实验平台设计了基于观测器的LQR与分数阶FOLQR控制器,实现了平台在扰动与模型不确定下的高精度轨迹跟踪与强稳定控制(如图1(a)所示);李丽等^[23]则针对含迟滞非线性的二自由度气动运动模拟平台,提出基于切换扩张状态观测器的自抗扰控制方法,有效抑制非线性与迟滞影响,实现了高精度、强鲁棒的姿态轨迹跟踪(如图1(b)所示)。3-DOF运动平台相较于2-DOF平台拓展了运动模拟维度。针对该类构型的设计理论研究,顾云鹭等^[24]开展了带独立约束支链的3-DOF并联平台

结构误差灵敏度分析,量化了支链铰链间隙、约束刚度与平台末端位姿精度的映射关系,为轻量化高精度并联构型的拓扑优化提供了量化依据(如图1(c)所示);Zhang等^[25]针对三自由度(1T2R)冗余驱动过约束机构,建立刚度解析模型并开展刚度特性分析,实现了全域内高刚度与优良动态性能的精准表征(如图1(d)所示);Chen等^[26]提出了一种新型3-DOF并联运动模拟器构型,建立了其完整的拉格朗日动力学模型,揭示了机构惯性参数与动态响应特性的关联规律,完善了少自由度飞行模拟平台的动力学设计理论体(如图1(e)所示)。

4-DOF运动平台作为介于3-DOF与6-DOF之间的折中构型,兼顾运动模拟的丰富性与结构的简洁性,弥补了三自由度平台无偏航运动的不足,同时避免了六自由度平台的高复杂度与高成本。针对该类构型的设计理论,程佳等^[27]建立了4TPS-PS并联4-DOF电动平台的运动学与受力模型,揭示从动支链受力特性及其与结构参数的

关系,验证了该构型在大负载稳定跟踪场景下的适用性(如图1(f)所示);张骁等^[28]设计了4-DOF混联运动平台并搭建虚拟样机,通过仿真分析其运动与动力学特性,为结构设计与部件选型提供了数据支撑;Forgó等^[29]则提出了一种新型联4-DOF机构,构建运动学模型并推导雅可比矩阵,分析了其工作空间、灵巧度与奇异构型特征,并结合拾取放置轨迹仿真验证了其运动学性能,为其工程化应用提供了理论支撑。

以Stewart并联构型为核心的6-DOF运动平台可实现空间笛卡尔坐标系下三个平移与三个旋转自由度的全维度运动输出,完整覆盖飞机全姿态变化与过载体感模拟,是专业级飞行模拟器的主流核心承载机构,如表1所示。针对该类构型的基础理论研究,Shao等^[30]针对重载高速6自由度并联平台,提出混合实时补偿控制策略,实现了几何误差与柔度误差的协同补偿,显著提升了重载高速工况下的运动控制精度(如图1(g)所示);唐美等^[31]针对6-DOF液压运动平台开展结构设计与联合仿真分析,建立运动学模型并完成虚拟样机验证,实现了多工况下平台的高精度位姿输出(如图1(h)所示);杨小龙^[32]系统构建了6-DOF并联机构的运动学、刚柔耦合动力学理论体系,提出了面向结构振动抑制的主动控制方法,完善了高刚度、高动态并联平台的结构动力学设计理论;Becerra-Vargas等^[33]建立了6-DOF飞行模拟运动基座的完整多体系统动力学模型,综合考虑了铰链间隙、驱动非线性等工程因素,为平台构型参数的精细化优化提供了完备的理论模型;Wei等^[34]针对6-DOF飞行训练模拟器运动平台设计了数字最优跟踪运动提示算法与EtherCAT多轴伺服控制系统,实现了长行程、连续旋转工况下的高精度位姿复现(如图1(i)所示);Lukianov等^[35]则分析了已有飞行模拟器Stewart平台数学模型的不足,指出缺乏描述平台稳定动态平衡运行条件的理论模型,基于达朗贝尔形式化方法提出了新的物理模型,能够确定上铰链反力和位置角极限值,为飞行模拟器运动平台的动态稳定性分析与操作边界确定提供了新的理论工具。上述研究表明,6-DOF平台的优势在于运动方向完备,而可用工作空间、动态性能与感知效果仍取决于几何参数、结构刚度和驱动能力的共同匹配。换言之,运动方向完

备并不等同于实际运动能力优异。

值得注意的是,平台最大转角并非由自由度数目直接决定,而是由作动器有效行程与平台特征尺寸之比、上下平台半径比、铰链允许转角、支链与平台之间的碰撞条件以及奇异位形边界共同限定。对Stewart平台而言,增大支腿行程或减小平台特征半径通常有利于扩展倾角,但同时可能降低承载刚度、增大驱动力需求并恶化雅可比矩阵条件数;改变上下平台半径比也会在姿态范围、力传递效率和抗倾覆刚度之间形成权衡。因此,表1中角度范围应理解为具体样机在几何约束、安全裕度和动力学性能综合作用下获得的代表性结果,而非该自由度构型的普适极限。

1.1.2 并联机构创新

随着航空训练场景的多样化,并联机构创新成为研究重点,从经典Stewart构型拓展至冗余驱动及串并联混合等新型构型,以适应不同场景对运动能力与成本平衡的需求。在串并联混合机构方面,Li等^[36]提出了一种结构紧凑、控制难度低的六自由度混合机构运动平台,通过构型创新实现了重载装备位姿调整场景下运动能力与控制复杂度的平衡,为飞行模拟器等重载运动平台的构型设计提供了新思路。在冗余驱动方面,周昌春等^[37]进一步提出了6-RRS超冗余驱动球面并联飞行模拟机构,采用电气伺服系统以克服液压伺服系统的固有缺陷,基于螺旋理论推导了雅可比矩阵,从灵巧度、刚度和奇异性三个维度对机构性能进行了系统分析。此外,为满足低成本训练场景的需求,Chen等^[26]提出了一种新型2R1T三自由度并联运动模拟器,基于牛顿—欧拉法与虚功原理建立了高效动力学模型,并通过逆动力学控制完成了仿真验证,为低成本运动模拟器的基础理论研究提供了参考。上述研究从串并联混合构型、冗余/超冗余驱动以及降自由度低成本构型等方面,拓展了飞行模拟器并联机构的构型创新空间,为不同训练场景下运动能力与成本平衡的最优构型选择提供了理论支撑。

1.2 典型驱动系统

驱动系统是运动平台的动力来源,其技术路线直接影响运动精度、响应速度、承载能力及运行经济性。当前主流技术路线分为电动驱动、液压

驱动、气动驱动及混合驱动四类^[13]。构型与驱动对运动性能的贡献具有不同层级:构型决定运动的几何边界,即可达自由度方向与工作空间范围;驱动功率与结构惯量则共同决定运动的动态边界,即系统可实现的最大线加速度与角加速度。线加速度上限取决于驱动单元的功率密度和动平台负载惯量,角加速度极限则由关节力矩裕度和

平台转动惯量共同决定。因此,加速度范围并非构型的固有属性,而是作动器选型、负载质量与结构刚度综合作用的结果,其优化需在上述因素之间寻求平衡,并与构型的工作空间分析形成协同设计。各类驱动技术的主要特点与适用场景对比如表2所示。

表2 不同驱动技术路线对比
Table 2 Comparison of different drive technology routes

驱动类型	响应速度	控制精度	功率密度	维护成本	可实现的典型加速度范围	典型应用
电动驱动	快	高	中等	低	线加速度: $\pm 3 \sim \pm 8 \text{ m/s}^2$, 角加速度: $50 \sim 200^\circ/\text{s}^2$	中轻型、无人机飞机模拟器
液压驱动	较快	较高	高	高	线加速度: $\pm 3 \sim \pm 10 \text{ m/s}^2$, 角加速度: $200 \sim 400^\circ/\text{s}^2$	大型民航客机、军用运输机模拟器
气动驱动	快	较低	低	低	线加速度: $\leq \pm 5 \text{ m/s}^2$, 角加速度: /	轻量化、低成本特定场景
混合驱动	较快	较高	高	中等	线加速度: $\pm 5 \sim \pm 10 \text{ m/s}^2$, 角加速度: /	兼顾精度与负载的中型模拟器

注:表中加速度数据为文献及平台报道的代表性范围,仅用于驱动技术路线间的量级比较。

1.2.1 电动驱动

电动驱动凭借响应速度快、控制精度高、无环境污染等优势,已成为中轻型飞机模拟器运动平台的主流技术方向。当前电动驱动领域的研究主要围绕高精度动力学控制与新型驱动架构创新两大核心方向展开。在高精度动力学控制方面,Shao等^[30]针对重载高速并行平台在复杂工况下的精度衰减问题,提出了一种集成可识别参数分离几何误差补偿与直接力反馈顺应误差补偿的混合实时补偿策略,有效提升了系统的运动精度;Chen等^[38]开发了基于PC的高速控制器,采用复杂自适应滑动模式控制方案,实现了特定期望运动的精准跟踪;李亦豪等^[39]则将逆解运算与洗出算法相结合,使电动缸动态跟随平台姿态变化,同时确保运动后能够返回中立位置,显著增强了训练人员的沉浸感。

在机构设计与新型驱动架构方面,Wei^[40]设计了六轴曲柄臂机构运动系统,基于PID控制器构建了可调速度与中距离行程控制体系,有效优化了多自由度运动耦合问题;Gan等^[41]提出了一种基于Z形弯曲铰链的三自由度XYZ平台,通过逆向排列铰接结构实现了近平面、小尺寸、大行程特性,并采用压电陶瓷执行器完成多轴双向运动驱动;齐思宁等^[42]针对直线超声波电动机驱动问题,开发了符合EtherCAT协议的CiA402规范驱动方案,实现了多超声波电机与传统伺服电机的控制

网络融合,成功应用于五自由度TRIPOD串并联平台,为高精度模拟器提供了新型驱动架构;朱华等^[43]系统比较了应用于变体飞行器的各类智能材料及作动器的性能特点,揭示了超声电机在变形驱动方面的技术优势,并提出了其应用所需解决的关键问题;Lee等^[44]提出了基于球面轮的运动平台设计方案,实现了三自由度无限转动与三自由度平移功能,且通过主动驱动控制使旋转运动独立于平移控制,为电动驱动平台的工作空间拓展提供了创新思路(如图1(j)所示)。综上,电动驱动技术已从单一控制性能优化,逐步向新型驱动机构、多自由度解耦控制及网络化架构集成等方向拓展。

1.2.2 液压驱动

液压驱动因功率密度高、负载能力强,在大型飞机模拟器(如民航客机、军用运输机)中仍占据不可替代的地位。其核心研究聚焦于非线性扰动抑制与多轴解耦控制两大关键问题。在非线性控制方面,Jiao等^[16]针对液压模拟器外框的多源不匹配扰动,设计了一种模型补偿自适应稳健控制器,通过实验识别耦合力矩,在线修正参数并引入伺服阀零偏置辅助控制,在提升高精度位置控制性能的同时,减轻了参数自适应与稳健控制项的负担;Chen等^[45]建立了以位移、速度、加速度为状态变量的级联模型,将不匹配不确定性转化为匹配不确定性,避免了反步控制中常见的微分爆炸问题;结合线性扩展状态观测器,设计了无符号函数

连续滑模控制,在有效抑制干扰的同时消除了抖振现象,简化了控制律设计。在多轴解耦控制方面,He等^[46]针对液压驱动冗余全并联机构提出了模态空间控制方法,通过将机械-液压系统转化为模态空间模型并利用特征值特性进行独立模态解耦,实现了各自由度的解耦控制与带宽扩展;Plumer^[47]构建了多轴伺服液压系统全流程解耦控制体系,为液压驱动飞机模拟器的多轴解耦控制提供了经典且可工程化的技术方案。总体而言,液压驱动技术正朝着高精度鲁棒控制、多轴解耦与系统带宽扩展的方向持续演进,以满足大型模拟器对高负载与高动态响应的双重需求。

1.2.3 气动驱动与混合驱动

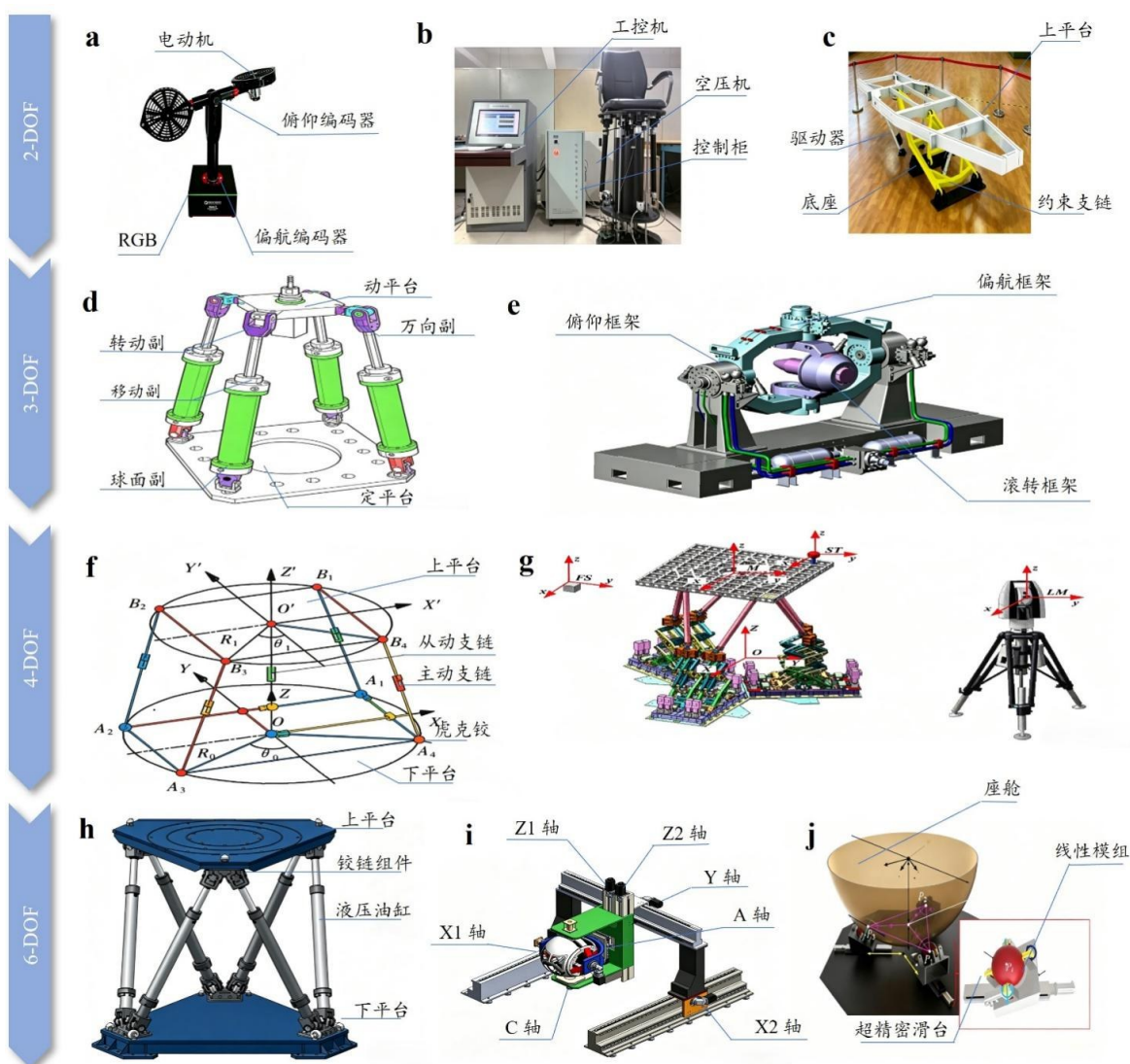
气动驱动与混合驱动作为电动与液压技术之外的补充路线,在轻量化、低成本及特定场景适配方面展现出独特应用潜力。在纯气动驱动领域,Liu等^[48]提出了一种三自由度悬浮运动机构,用于模拟驾驶舱的偏航、滚转及俯仰运动;基于拉格朗日法建立了动力学方程以求解驱动力矩,并采用“主动分支位置控制+被动分支力控制”的力-位置混合控制策略,优化了分支力分配,提升了机构的运动协调性与稳定性,为直升机模拟器提供了轻量化解决方案。在混合驱动领域,乔建飞等^[49]搭建了基于电静液直驱技术的六自由度运动定位平台,该方案结合了电机的高精度与液压系统的高功率密度优势,并提出了主从协同控制算法,实现了不同负载下的高精度位置控制,为中载场景提供了兼顾精度与负载能力的折中方案;Huang等^[50]开发了电液混合驱动悬臂平台,采用耐辐射材料与冗余自由度设计,验证了混合驱动技术在特殊环境模拟器中的工程可行性。综上所述,气动与混合驱动技术虽起步较晚,但凭借其在特定工况下的适配优势,正逐步从原理验证向工程应用过渡,成为驱动技术体系的重要补充。结构设计驱动技术的协同优化是实现高性能运动平台的关键,当前研究已从单一性能指标优化转向多目标集成优化。

1.3 协同优化方法

在运动平台结构与驱动技术研究中,单一维度优化难以兼顾精度、响应速度与工程经济

性。机械结构、驱动系统与控制策略的协同匹配成为性能提升的关键。在结构-驱动匹配方面,段学超等^[51]针对柔性支撑 Stewart 平台开展动力学建模与轨迹跟踪控制研究,揭示了结构柔性对驱动控制精度的影响机理,为柔性工况下运动平台的结构-驱动一体化设计提供了理论依据;杨小龙^[32]则系统开展了六自由度并联机器人的运动学、动力学建模及主动振动控制研究,实现了结构振动与驱动响应的协同抑制,完善了高刚度、低振动结构设计的理论体系。在结构-控制协同方面,Xie等^[52]在 SE(3)流形上设计了鲁棒终端滑模控制器,将几何非线性与载荷不确定性纳入统一控制框架,强化了系统抗干扰能力与高精度姿态复现性能;Tong等^[53]针对飞行失速改出训练需求,设计了基于模型预测控制的洗出算法,实现了运动空间约束与感知逼真度的协同优化,提升了运动模拟的安全性及沉浸感。在性能-成本平衡方面,可折叠机构创新与智能优化算法的应用,为运动平台的结构设计提供了多目标优化路径;Kalafat等^[54]提出了折纸启发的可折叠微型 Stewart 并联机构,该机构在保持六自由度完整运动能力的同时,具有结构紧凑、占用空间小的特点,为并联平台的紧凑化、便携化设计提供了新的技术方案;在智能优化层面,Petrašinović等^[55]将实数编码混合整数遗传算法应用于旋转式 Stewart 平台的几何优化中,以工作空间与运动性能约束为目标,实现了平台几何参数与物理约束的自适应匹配,优化所得几何参数可直接映射至离散可用值,为飞行模拟器运动平台的定制化设计提供了智能化解决方案。

综上所述,飞行模拟器运动平台的结构设计与驱动技术研究已从单一构型优化拓展至多目标协同。在结构构型方面,六自由度 Stewart 平台仍是专业级模拟器的主流选择,但冗余驱动、串并联混合及可折叠机构等新型构型正展现出改善工作空间与刚度特性的潜力;在驱动技术方面,电动驱动凭借响应快、精度高成为中轻型平台首选,液压驱动因功率密度高仍主导大型模拟器,气动与混合驱动则在特定场景下形成有效补充。结构、驱动与控制的协同优化已成为提升平台综合性能的关键路径。



(a) Quanser Aero2 系统实物图^[22], (b) 气动运动模拟平台组成图^[23], (c) 飞行动态模拟器^[24], (d) 虚拟原型^[25], (e) 三轴 HHFMS 的结构布局^[26], (f) 4TPS-1PS 并联机构的结构简图^[27], (g) 运动学校准中的坐标系^[30], (h) 六自由度液压平台体结构组成^[31], (i) 六自由度运动平台^[34], (j) 运动平台 I 的设计与机械结构^[44]

图 1 构型图

Fig. 1 Configuration diagram

2 运动平台动力学建模与控制策略

飞机模拟器运动平台的核心性能取决于其运动学与动力学建模的精度,以及控制策略的有效性。近年来,随着并联机构理论、智能控制算法及数字仿真技术的不断发展,运动平台在建模方法、控制架构与系统验证等方面取得了显著进展。本节从运动学建模、动力学建模、鲁棒控制策略及智能控制与自适应控制四个方面进行系统梳理。

2.1 运动学建模方法

运动学分析是运动平台设计与控制的基础,

核心聚焦工作空间与奇异位形分析、正逆运动学求解、运动学与静力学统一建模 3 个方面,旨在实现平台运动的精准描述、高效解算,并统一表征其力学特性。

2.1.1 工作空间与奇异位形分析

工作空间与奇异位形分析是评价并联运动平台运动性能的两大核心指标。叶鹏达等^[56]系统综述了该领域的方法进展:工作空间研究主要采用立体几何法(精度高但操作复杂)、有限离散法(便于程式化但存在精度与效率的矛盾)以及神经网络、区间分析等现代数学方法(理论深刻但应用不广);奇异位形分析则包括代数法(基于雅可比矩

阵,适用性广但物理意义不直观)、几何法(直观但难以穷举)和运动学法(能揭示物理本质)。近年来,并联机构领域的综述性文献进一步丰富和拓展了这一分析框架。Wang等^[57]进一步从构型综合、性能评价指标体系(涵盖可重构度、工作空间、奇异性、刚度及动力学等)以及工程实现挑战等方面系统综述了可重构并联机构的研究进展。此外,在工作空间求解方面,Ding^[58]针对空间各向同性 Stewart 平台,提出了以球坐标表达工具中心点位置、以单位四元数表达动平台姿态的优化算法,求解最大无碰撞且无奇异的工作空间。在奇异轨迹解析方面,Nag 和 Bandyopadhyay^[59]则提出了“无奇异球”概念,并给出了解析化的代数求解方法。尽管如此,当前研究仍面临求解精度与计算效率之间的权衡,以及多维参数化表示与直观图形化描绘之间的张力。对于飞行模拟器而言,实现无奇异工作空间的精确描述与高效规划仍是重要的突破方向。

针对大型飞机飞行模拟器液压 Stewart 平台的奇异位形问题,马建明^[60]推导了含任意三个位姿变量的奇异轨迹方程解析表达式,提出了奇异区与无奇异区的概念及基于支腿长度的判据;通过综合考虑结构参数、支腿静态力、条件数与构型分岔行为,设计了无奇异结构平台,验证了其在可达工作空间中不存在奇异位形;同时,设计了液压保护装置,并通过增加三条冗余支腿消除了 Hunt 奇异位形,为飞行模拟器运动平台的安全运行提供了完整的理论框架与工程解决方案(如图 2(a)所示)。

2.1.2 运动学正逆解算法与高精度求解

在明确工作空间边界与奇异规避策略的基础上,正逆运动学求解成为实现实时运动控制的关键环节。其中,逆运动学求解具有封闭解析解,计算直接、效率高,易于实时实现,且已形成成熟的理论与工程方法;而正运动学求解因其强非线性、多解性及对奇异位形的敏感性,长期被视为 Stewart 平台的经典难题。近年来,学者们从不同技术路径取得了重要进展。在几何代数与李群李代数建模方面,Zhou等^[61]采用对偶四元数与 D-H 方法,引入铰链位姿与支链 D-H 参数,构建了包含 174 项几何参数的非线性模型,显著提升了存在制造与装配误差时的运动学描述精度(如图 2(b)所示);Yang等^[62]基于旋量指数积与李群李代数理论,将每条支链建模为 6 自由度串联机械臂,利用指数映

射描述刚体运动,通过闭环条件推导出位姿与被动关节位移间的线性微分关系,并采用 Levenberg-Marquardt 算法迭代求解,实现了通用 Stewart 平台的实时正解。在数值迭代与智能算法融合方面,Liu等^[63]提出了多元多项式回归(MPR)与牛顿迭代(NR)相结合的 MPR-NR 混合算法,利用 MPR 快速获取初始位姿解,再通过 NR 迭代修正,在保证精度的同时显著减少了计算时间与迭代次数,适用于实时控制;Zhu等^[64]将机构铰接点与连接关系建模为图结构,设计了图卷积 Transformer 网络,采用切比雪夫图空洞卷积提取多尺度特征,结合图注意力机制增强长程依赖,并通过 9 维 SVD 正交化映射解决了流形上的旋转不连续问题;Ghorbani等^[65]针对 6-DOF 构型飞行模拟器,系统比较了多层感知器、径向基函数网络和自适应神经模糊推理系统与经典 Newton-Raphson 法的实时性能,验证了神经网络方法在正解中的可行性。在概率滤波方法方面,刘小平等^[66]构建了融合平台位姿、速度与驱动杆长的状态空间模型,将正运动学求解转化为非线性系统状态估计问题,采用粒子滤波算法以带权重粒子近似后验概率分布,有效克服了传统数值法在奇异位形附近收敛失败以及智能算法精度波动的缺陷,为高可靠性实时位姿估计提供了新思路。综上,正运动学求解正从单一数值或智能方法向几何代数、混合算法与概率滤波协同发展的方向演进,以同时满足高精度、强实时性与奇异鲁棒性的工程需求。

2.1.3 基于旋量理论的运动学与静力学统一建模

在并联机构运动学与静力学分析中,传统基于笛卡尔坐标的建模方法往往需要分别处理位置、速度、力等不同物理量,且涉及复杂的代数运算与二阶数值插值,计算效率较低。旋量理论通过将刚体的角速度与线速度统一表达为速度旋量、将力与力矩统一表达为力旋量,为运动学与静力学的耦合建模提供了简洁统一的数学框架。

在旋量理论统一建模方法方面,Zhao等^[67]系统提出了 Gough-Stewart 平台的旋量理论统一建模与数值求解方法。该方法在旋量坐标下同时描述平台的运动与受力,将运动学正逆解与静力学平衡方程纳入同一代数体系,避免了传统方法中繁琐的坐标变换与迭代插值。通过圆形轨迹与复杂轨迹下的数值仿真,并与 Gallardo-Alvarado 方法对比,验证了该方法计算效率高、程序结构紧凑、适用于复杂空间多体系统等优势,为并联机构

及其他空间多体系统的运动静力学分析提供了一种理论清晰、便于编程实现的统一框架(如图2(c)所示)。在旋量理论与李群李代数融合应用方面, Yang等^[62]将旋量指数积与李群李代数相结合,将每条支链建模为串联机械臂,通过PoE公式建立正向运动学,实现了通用Stewart平台的实时正解;此外,叶鹏达等^[56]在亦在综述中指出,旋量方法具有与坐标系无关的分析优势,能够揭示奇异发生的物理本质,是并联机器人运动性能研究的前沿方向之一;Müller等^[68]则基于李群递归公式,将并联机构的逆动力学分解为多个支链的并行求解,实现了二阶逆动力学的高效计算,进一步拓展了旋量理论在动力学领域的应用。综上,基于旋量理论的运动学与静力学统一建模方法,凭借其几何直观性、计算高效性和坐标系无关性,已成为并联机构分析的重要工具。未来研究可进一步探索旋量方法与智能算法、实时控制策略的深度融合,以应对飞行模拟器运动平台对高动态、高精度建模的工程需求。

2.2 动力学建模方法

动力学建模方法伴随飞行模拟器运动平台性能需求持续演进。早期以牛顿-欧拉法、拉格朗日法、虚功原理等经典解析方法为主,依托刚体力学与能量守恒建立基础方程,物理意义清晰但计算较为复杂。随后,以凯恩方法、递归李群动力学为代表的高效建模技术得到广泛应用,通过伪速度、约束解耦与分支并行求解简化方程,显著提升实时性,更适配控制系统设计。近年来,建模进一步向精细化方向发展,逐步纳入结构柔性、铰链特性、惯性参数辨识等实际因素,形成考虑多因素综合作用的动力学模型,为更真实的模拟与精确控制提供了理论支撑。

2.2.1 经典解析建模方法

经典解析建模方法主要包括牛顿-欧拉法、拉格朗日法和虚功原理,通过严格解析推导建立系统力与运动的关系,物理意义清晰、形式规范,是构建动力学方程与刚度、质量矩阵的理论基准。

在牛顿-欧拉法方面, Dasgupta和Mruthyunjaya^[69]采用该方法推导了通用Stewart平台的封闭形式动力学方程,为后续飞行模拟器动力学建模提供了理论基础。在虚功原理方面, Kalani等^[70]基于虚功原理推导了Gough-Stewart平台的逆动力学与正向动力学封闭解析式,适用于飞行模拟器等

高性能运动平台(如图2(d)所示); Ardakani等^[71]基于虚功原理建立了双段冗余Gough-Stewart混合机械臂的动力学模型,通过Simscape仿真验证模型精度,平均误差为1.537%。此外,在牛顿-欧拉法与虚功原理联合方面, 辛建等^[72]将Gough-Stewart平台应用于空间微振动模拟,利用牛顿-欧拉法建立了考虑驱动腿和铰链质量属性及负载质心偏心的动力学模型,并基于虚功原理推导了广义刚度矩阵与质量矩阵,通过特征方程求解得到前六阶固有频率与主振型解析式,有限元分析与锤击实验验证表明理论模型误差在5%以内。在拉格朗日法方面,洪振宇等^[12]以具有一平动两转动自由度的并联飞行模拟运动平台为对象,采用拉格朗日法建立动力学模型,并提出次对角线消去法简化速度系数矩阵和惯量矩阵,在保证模型准确性的同时提高计算速度。

2.2.2 面向控制的高效建模方法

经典解析方法虽物理意义清晰,但计算量随自由度增加急剧上升,难以满足飞行模拟器的实时控制要求。凯恩方程与递归李群等高效建模方法通过引入伪速度、约束解耦及支链并行求解策略,可以有效降低动力学方程维数与计算量。

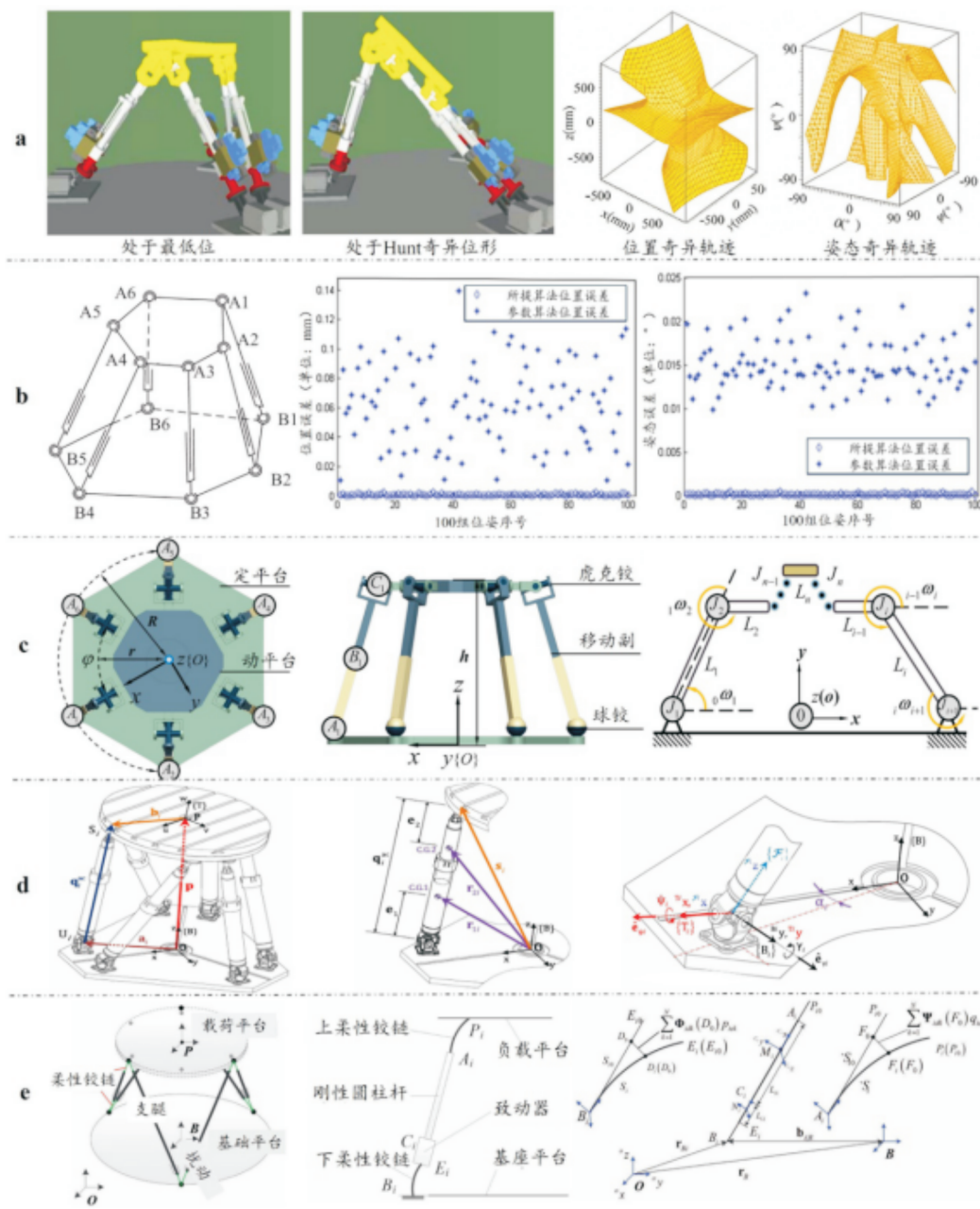
在凯恩方程方面, Liu等^[73]提出Gough-Stewart平台正向动力学建模方法,将各支腿视为独立子系统分别推导动力学方程,通过拉格朗日乘子处理约束,采用Baumgarte稳定化方法将微分代数方程转化为可数值求解的形式; Jiao等^[74]提出考虑柔性铰链的Stewart平台动力学建模方法,基于凯恩方程结合虚功率原理建立新动力学模型,并应用于无人机飞行模拟器开发(如图2(e)所示);李鹭扬等^[75]以任务空间中动平台参考点的速度与角速度作为伪速度,推导各分支及动平台的偏速度与加速度,得到变量少、形式简洁的封闭型动力学方程,避免引入理想约束反力,便于在任务空间设计控制模型;Wu等^[76]采用凯恩方法建立6-SPS并联机构包含全构件惯性力与重力的逆动力学模型,通过ADAMS仿真验证模型正确性。

在递归李群方法方面, Müller等^[68]针对串联弹性执行器驱动的并联运动平台,提出递归李群动力学建模与高阶逆动力学求解方法。该方法利用机构拓扑结构特点,将整体动力学分解为多个支链动力学的并行求解,实现二阶逆动力学的高效计算,为轨迹跟踪控制提供实时前馈算法。

2.2.3 精细化建模与参数辨识

在满足实时控制需求的基础上,进一步提升模型精度要求动力学建模纳入结构柔性、关节摩擦、间隙等实际因素,并发展出基于实测数据的参数辨识技术。在惯性参数辨识方面,李远慧等^[77]建立了电动缸推力与电机转矩之间的动态传递函数,利用易获取的电机电流信号进行辨识。采用

凯恩法建立平台动力学模型,施加正弦激励并采集响应信号,通过傅里叶变换提取基频分量以消除科氏力与重力影响,构建线性辨识方程并利用最小二乘法求解。基于ADAMS-MATLAB的联合仿真表明,质量与转动惯量的辨识误差分别小于2%和7%。



(a) Hunt 奇异位形仿真:处于最低位、处于 Hunt 奇异位形;Stewart 平台的位置奇异轨迹、姿态奇异轨迹^[60], (b) 斯图尔特平台示意图、位置误差比较、姿态误差比较^[61], (c) 斯图尔特平台的几何结构:俯视图、正视图、闭合运动链^[67], (d) 6-UPS 并联机器人第 i 条腿的闭环向量、第 i 个被动万向节的局部坐标系、第 i 个主动腿的位矢和尺寸参数^[70], (e) 具有柔性铰链的斯图尔特平台的机械结构、腿部详细模型、第 i 条腿的计算模型^[74]

图2 飞行模拟器运动平台运动学与动力学建模方法

Fig. 2 Kinematics and dynamics modeling method for flight simulator motion platform

2.3 运动平台鲁棒控制策略

飞行模拟器运动平台在实际运行中面临模型参数不确定性、载荷变化及外部扰动等多重干扰因素。鲁棒控制策略旨在不依赖精确数学模型的前提下,保证系统在扰动条件下的稳定性和轨迹跟踪精度。

2.3.1 滑模与变结构鲁棒控制

滑模控制对参数摄动和外部扰动具有不敏感性,是解决Stewart平台鲁棒控制问题的经典方法。Xie和Dai^[52]设计了鲁棒终端滑模控制器,将几何非线性与载荷不确定性纳入统一控制框架,实现了优于传统笛卡尔空间方法的控制效果(如图3(a)所示);Chen等^[45]建立了以位移、速度、加速度为状态变量的级联模型,将不匹配不确定性转化为匹配不确定性,结合线性扩展状态观测器设计了无符号函数连续滑模控制,有效抑制了干扰并消除了抖振现象;Zhou等^[78]进一步将改进型等价输入干扰与滑模控制相融合,利用内模原理保证稳态跟踪精度,通过滑模控制器增强扰动抑制性能,实验验证了其在外扰作用下的优越性。在此基础上,Nguyen等^[79]提出了一种基于扩展滑模观测器(ESMO)的高精度运动控制策略,通过两个ESMO同时估计执行器的不可测角速度以及集总失配与匹配不确定性,结合反步技术设计了观测器控制器,并在液压旋转执行器上验证了该方法相较于传统扩展状态观测器方法的优势。

2.3.2 自适应与模型预测鲁棒控制

在自适应鲁棒控制方面,Jiao等^[16]针对液压飞行模拟器外框的多源不匹配扰动,提出了模型补偿自适应稳健控制器,通过实验识别耦合力矩并在线修正参数,同时引入伺服阀零偏置辅助控制,在提高高精度位置控制性能的同时减轻了参数自适应负担(如图3(b)所示)。

在模型预测鲁棒控制方面,Tong等^[53]针对飞行失速改出训练需求,设计了基于模型预测控制的洗出算法,实现了运动空间约束与感知逼真度的协同优化(如图3(c)所示);Huang等^[80]提出了基于增量非线性动态逆的液压六足飞行模拟器运动系统力跟踪控制器,利用压力差导数的反馈,不依赖于精确模型和参数,对模型不确定性具有固有的鲁棒性,仿真结果表明其优于传统非线性动态逆方法。

2.3.3 多轴解耦与模态空间控制

He等^[46]针对液压驱动冗余全并联机构提出了模态空间控制方法,通过将机械-液压系统转化为

模态空间模型并利用特征值特性进行独立模态解耦,实现了各自由度的解耦控制与带宽扩展。在此基础上,Plummer和Guinzio^[13]建立了基于模态控制的框架,将多输入多输出系统解耦为多个单输入单输出通道,显著简化了控制器设计;Lukianov和Kabanyachyi^[35]分析了基于Stewart平台的飞行模拟器现有数学模型,并发现缺乏能描述平台稳定动态平衡条件的模型。为此,其基于达朗贝尔形式化方法和机械系统稳定平衡的概念,提出了新的物理模型。研究表明,其能够确定上铰链反力和位置角极限值,为飞行模拟器运动平台的动态稳定性分析与操作边界确定提供了新的理论工具。

2.4 智能控制与自适应控制

飞行模拟器运动平台具有强非线性、多变量耦合及工况时变特征,传统控制方法难以在全包线内保持最优性能。智能控制与自适应控制通过在线学习与参数自整定,提升了对模型不确定性和飞行工况变化的适应能力。针对上述挑战,近年来的研究主要沿神经网络参数辨识、自适应滑模控制及深度强化学习等方向展开。

2.4.1 神经网络与参数辨识

李远慧等^[77]通过傅里叶变换提取基频分量消除科氏力与重力影响,仿真表明质量与转动惯量的辨识误差分别小于2%和7%;Ghorbani和Omurlu^[65]针对6-DOF构型飞行模拟器,系统比较了多层感知器、径向基函数网络和自适应神经模糊推理系统与经典Newton-Raphson法的实时性能,验证了神经网络方法在正解中的可行性(如图3(d)所示);Song等^[81]提出了一种基于人工神经网络的鲁棒关节补偿器标定方法,采用耦合/解耦前馈神经网络逼近关节修正函数,并在数控系统中嵌入关节补偿器实现在线实时误差补偿,显著提升了静态位姿精度。

2.4.2 自适应滑模控制

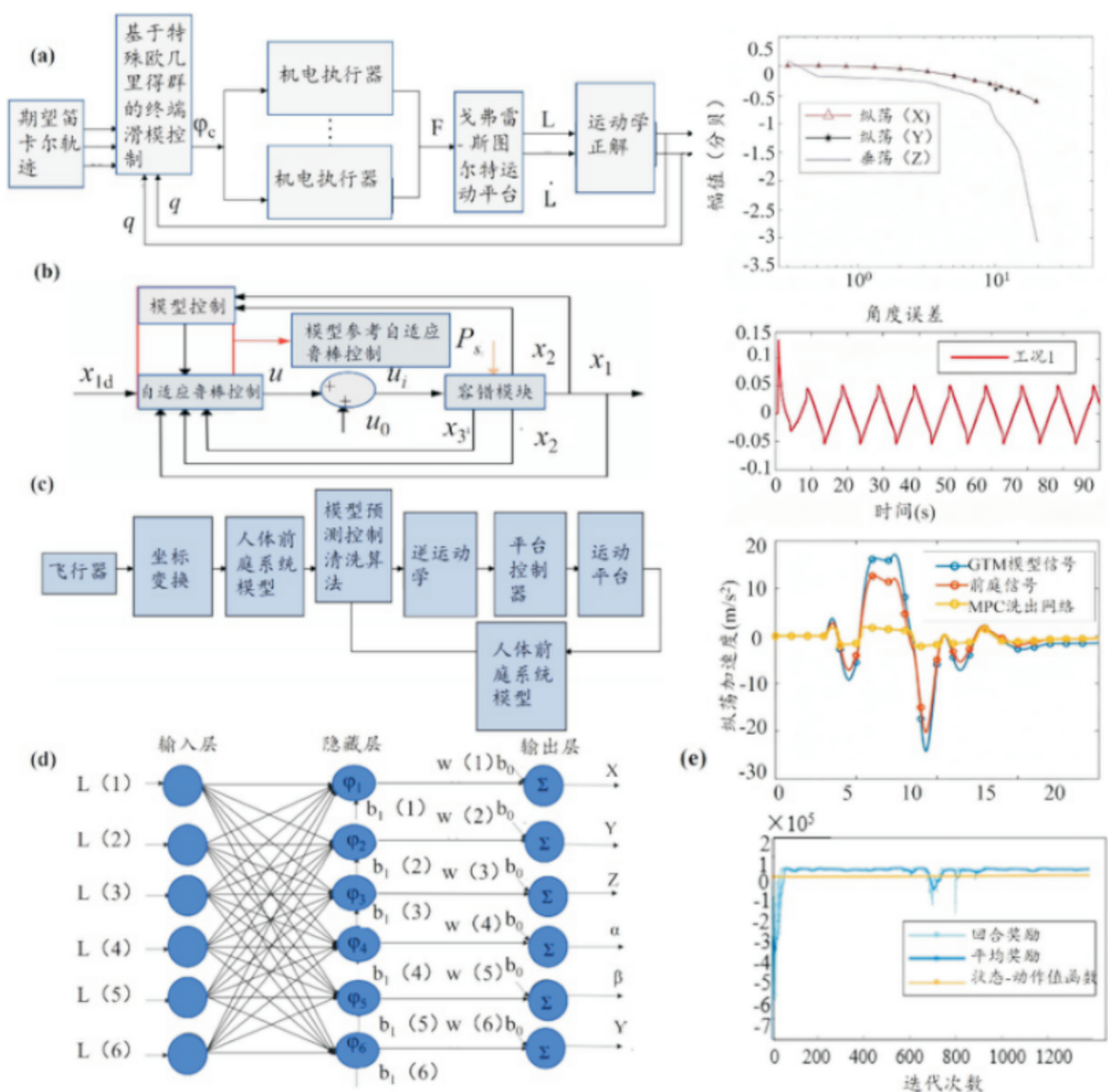
针对飞行模拟器运动平台参数不确定性和外部扰动问题,Wu等^[82]提出了一种任务空间非线性自适应滑模控制器,将不确定参数分为常值参数和时变参数,结合自适应控制与滑模控制实现高精度轨迹跟踪。数值仿真表明,该控制器能够准确识别平台的载荷、惯量、质心等参数,并在存在参数不确定性和外部扰动时保持良好的跟踪性能。此外,针对Stewart平台的强非线性与时变特性,Safeena等^[83]针对Stewart平台的强非线性与时

变特性,提出自适应超螺旋平滑积分滑模控制器与自适应扭转平滑积分滑模控制器,通过超扭转控制替代积分滑模律中的不连续部分实现平滑累积,并使增益随扰动幅值自适应调节,在保证鲁棒性的同时有效抑制抖振。

2.4.3 深度强化学习与智能优化

Kong等^[84]基于深度确定性策略梯度算法设计了电液 Stewart 并联机构的轨迹跟踪控制器,通过 Actor-Critic 框架在线调整六个 PID 控制器的增益

参数,在强耦合、非线性工况下最大位置误差降低超过 40%(如图 3(e)所示);Asadi等^[85]采用遗传算法进化最优洗出滤波器,以内耳模型构建感知误差评价函数,最小化感知误差与工作空间边界冲突,实现了滤波器系数的自适应整定;Petrašinić等^[55]将实数编码混合整数遗传算法应用于旋转式 Stewart 平台的几何优化,实现了平台几何参数与物理约束的自适应匹配。



(a) 面向 G-S 运动系统、基于 SE(3) 的控制框架以及平动模式下的伯德图^[52], (b) 基于模型补偿的控制框图以及不同控制策略下的跟踪误差比较^[16], (c) 基于模型预测控制的运动洗出系统原理框图以及不同控制策略下的跟踪误差比较^[53], (d) 面向正运动学问题的径向基函数神经网络设计^[65], (e) 基于深度确定性策略梯度智能体的奖励值随训练回合变化曲线^[84]

图3 运动平台鲁棒控制与智能控制

Fig. 3 Robust control and intelligent control of motion platform

综上所述,飞行模拟器运动平台的动力学建模与控制策略研究正朝着高精度、高实时性与强鲁棒性方向深入发展。在建模方面,经典解析方法奠定了理论基础,凯恩方程与递归李群等高效方法提升了实时计算能力,精细化建模与参数辨识进一步逼近工程实际;在控制方面,滑模控制、自适应鲁棒控制及模态空间控制有效应对了参数不确定性与外部扰动,而神经网络、深度强化学习等智能方法则为复杂工况下的自适应控制提供了新途径。未来需在模型复杂度与计算效率之间寻求更好平衡,并推动智能控制算法的工程化落地。

3 运动逼真度与生理感知模拟技术

飞行模拟器运动平台的结构设计、驱动配置与控制策略,最终统一于高逼真度运动感知反馈这一核心目标。平台物理性能与人体感知特性之间存在根本性矛盾:运动行程制约持续加速度的模拟时长,系统带宽限制高频振动信号的复现能力,作动器输出能力与平台结构共同决定系统瞬态响应逼真水平。在有限行程的约束下,平台必须依靠洗出算法实现机构复位;该算法的参数整定,须以前庭系统频率响应作为生理学边界,同时兼顾视-前庭感知兼容约束。上述机械性能与人体感知之间的映射关系,直接框定了构型选型、驱动配置与算法设计的理论边界。围绕上述关键问题,本节从运动逼真度理论及评估、体感模拟算法与生理感知建模、高逼真度仿真验证与系统集成三方面,系统梳理相关研究进展。

3.1 运动逼真度理论及其评估方法

3.1.1 逼真度理论及模型驱动的评估方法

运动逼真度指飞行模拟器在运动学与动力学层面复现真实飞行的准确程度,通常包含物理、感知与行为三个维度,分别对应硬件匹配、飞行员主观感知及操作行为一致性。在此基础上,逼真度评估成为模拟器设计、鉴定与等级认证的基础,其关键在于建立飞行员模型以量化模拟器与真实飞行器的相似程度。

早期评估主要依赖结构模型与控制论两类经典方法。赵国昌和周文藻^[86]对此进行了系统综述:前者通过伯德图差异定义逼真度度量值,后者量化飞行员感知反馈下的行为参数。然而,这两

类方法均存在明显局限:结构模型缺乏可接受界限,难以判定多大差异可被接受;控制论方法局限于单轴任务,无法推广至多轴耦合场景。为克服上述局限,研究者开始将人体感知模型直接纳入逼真度评估与优化框架。在算法设计方面,Tong等^[53]针对飞机翻转预防与恢复训练场景,提出了基于模型预测控制的洗出算法,通过坐标变换将机体运动转换到平台坐标系,以最小化真实飞行与模拟训练之间的感知运动不匹配。在评价方法方面,Jiang等^[87]则提出了基于CRITIC权重法结合灰色关联分析的客观评价方法,使目标运动提示测试能够通过期望信号、算法处理、平台输出和感知模型四个环节量化保真度。上述研究从算法设计与评价方法两端协同推进了逼真度量化研究的进展。

3.1.2 基于生理信号与虚拟现实的评估新方法

近年来,生理信号监测与虚拟现实技术为逼真度评估提供了新的客观手段。在基于生理信号的工作负荷与状态评估方面,Gateau等^[88]利用fNIRS技术结合MACD滤波器和支撑向量机分类器,实现了飞行员工作负荷的实时状态估计,可连续监测认知负荷变化(如图4(a)所示);孙瑞山和汪莹^[89]研究了飞行模拟器环境下飞行员的视觉特征,发现模拟飞行任务中飞行员眼动模式与认知负荷密切相关,视觉注意力分配策略受任务难度和飞行经验显著影响。在基于虚拟现实的集成验证平台方面,Oberhauser和Dreyer^[14]开发的虚拟现实飞行模拟器集成了眼动追踪、生理数据采集与运动追踪工具,为驾驶舱人机界面早期评估提供了低成本验证平台(如图4(b)所示);Cross和Ryley^[90]针对协作式虚拟现实飞行模拟器的循证训练效果进行了系统研究,证实了协作式虚拟环境在初始副驾驶培训场景中的可行性,表明虚拟现实飞行模拟器可作为传统全飞行模拟器的有效补充。在基于多模态生理信号与机器学习的建模方法方面,Li等^[91]针对基于简化车辆操作的eVTOL飞行器操控品质评估问题,开展了基于任务元素的模拟飞行实验,同步采集了操控品质主观评分、半结构化访谈反馈以及肌电和眼动追踪数据,基于二维卷积神经网络的评估模型达到了93.6%的预测准确率。季瑞童等^[92]基于TCN-LSTM与层次化注意力机制进行机组疲劳预测;刘双等^[93]建

立了基于注意资源分配的情境意识模型。融合多模态生理信号与机器学习方法已成为提升逼真度评估客观性和准确性的有效技术路径。

3.2 体感模拟算法与生理感知建模

3.2.1 人体运动感知特性与阈值建模

体感模拟算法的设计必须建立在对人体运动感知特性深刻理解的基础上。感知阈值是洗出算法中倾斜协调通道参数设置的重要生理约束。Kraft等^[94]通过心理物理学实验系统测试了不同频率下的感知阈值,发现0.04-0.33 Hz频率范围内倾斜协调增益在0.5-1.0之间可产生真实线性感知,旋转感知阈值对应2-4 deg/s的角速度;Haburcakova等^[95]进一步揭示了前庭眼动反射(VOR)阈值的频率依赖性:低频段阈值较高,中频段显著降低,这一特性要求洗出滤波器截止频率必须与前庭系统的频率响应相匹配。上述阈值研究为算法参数设计提供了生理学边界,使得洗出算法能够利用人体感知的不敏感性来隐藏复位运动,从而在有限行程内最大化有效运动空间。

3.2.2 平台动态特性对体感算法实现的约束

体感模拟算法的有效性不仅取决于滤波器结构与参数整定策略,更受平台自身动态特性的刚性约束。固有频率、阻尼比与传动间隙等机械因素,共同构成洗出算法设计的物理边界。这一约束的根源在于平台工作空间与人体感知能力之间的固有矛盾。Springer等^[96]指出,平台每自由度均受限于有限行程,当工作空间仅为商用模拟器的千分之一量级时,经典洗出算法难以直接适用,须在感知阈值以下引入死区恢复策略以实现平台回中。然而,死区策略的有效性依赖于滤波器参数与平台动态特性的匹配程度。若高通或低通滤波器的截止频率与平台固有频率接近,则易诱发结构共振,导致运动线索的幅值放大与相位畸变。王辉等^[97]通过将洗出方程离散化并对滤波器截止频率与阻尼率进行优选匹配,验证了频率参数对逼真度的改善效果。Lemes等^[98]进一步从实验层面定量揭示了这一约束的工程尺度,发现洗出滤波器造成的延迟占平台总延迟的43%至86%,固有频率与阻尼比的准确估算对优化系统总延迟至关重要。上述研究表明,平台物理约束应贯穿于洗出滤波器参数整定的全过程:截止频率与固有频率须保持足够分离裕度,阻尼配置须兼顾瞬态

响应与残余振荡抑制,传动间隙须控制在体感阈值以下。洗出算法设计的本质,是在平台物理能力与人体感知特性之间寻求协同最优。

3.2.3 视觉-前庭多模态交互机制

视觉与前庭交互的神经机制为多通道体感算法提供了更深层的理论依据。Liu和Zeng^[99]综述了自运动感知中视觉与前庭信号的整合机制,指出贝叶斯推断框架能够解释多感官信息的最优融合过程,先验知识在感知决策中发挥重要作用(如图4(c)所示)。基于这一理论,Yoshioka等^[100]提出了结合干电极生理测量与机器学习的运动病分类方法,通过采集EEG、EMG、心率等信号实现运动病的实时预测(如图4(d)所示)。同时,Asif和Iqbal^[101]从模型基控制角度验证了正向动力学闭环控制对运动提示逼真度的提升作用。

3.2.4 基于生理测量的运动病与状态评估

运动病与飞行员状态评估是生理感知建模的重要应用方向。Yoshioka等^[100]的工作已展示了多模态生理信号在运动病分类中的潜力。国内学者亦开展了深入探索;季瑞童等^[94]基于TCN-LSTM与层次化注意力机制进行机组疲劳预测,刘双等^[93]建立了基于注意资源分配的情境意识模型。上述研究表明,融合多模态生理信号与机器学习方法已成为提升飞行员状态监测准确性的有效技术路径,为体感模拟算法的个性化参数整定提供了实时反馈依据。

3.3 高逼真度仿真验证与系统集成

3.3.1 系统集成架构与洗出算法优化验证

高逼真度仿真验证的实施依赖于系统集成层面的多环节协同。运动提示系统包括洗出算法、逆运动学模型、作动器动力学模型及正运动学模型,坐标系统涉及机体坐标系、固定基座坐标系和平台坐标系三个层次^[53](如图4(e)所示)。各模块的建模精度与实时解算能力直接影响运动提示的逼真度。仿真验证通常采用硬件在环或飞行员在环方式,结合典型飞行任务场景,对比参考运动与平台实际运动之间的误差。

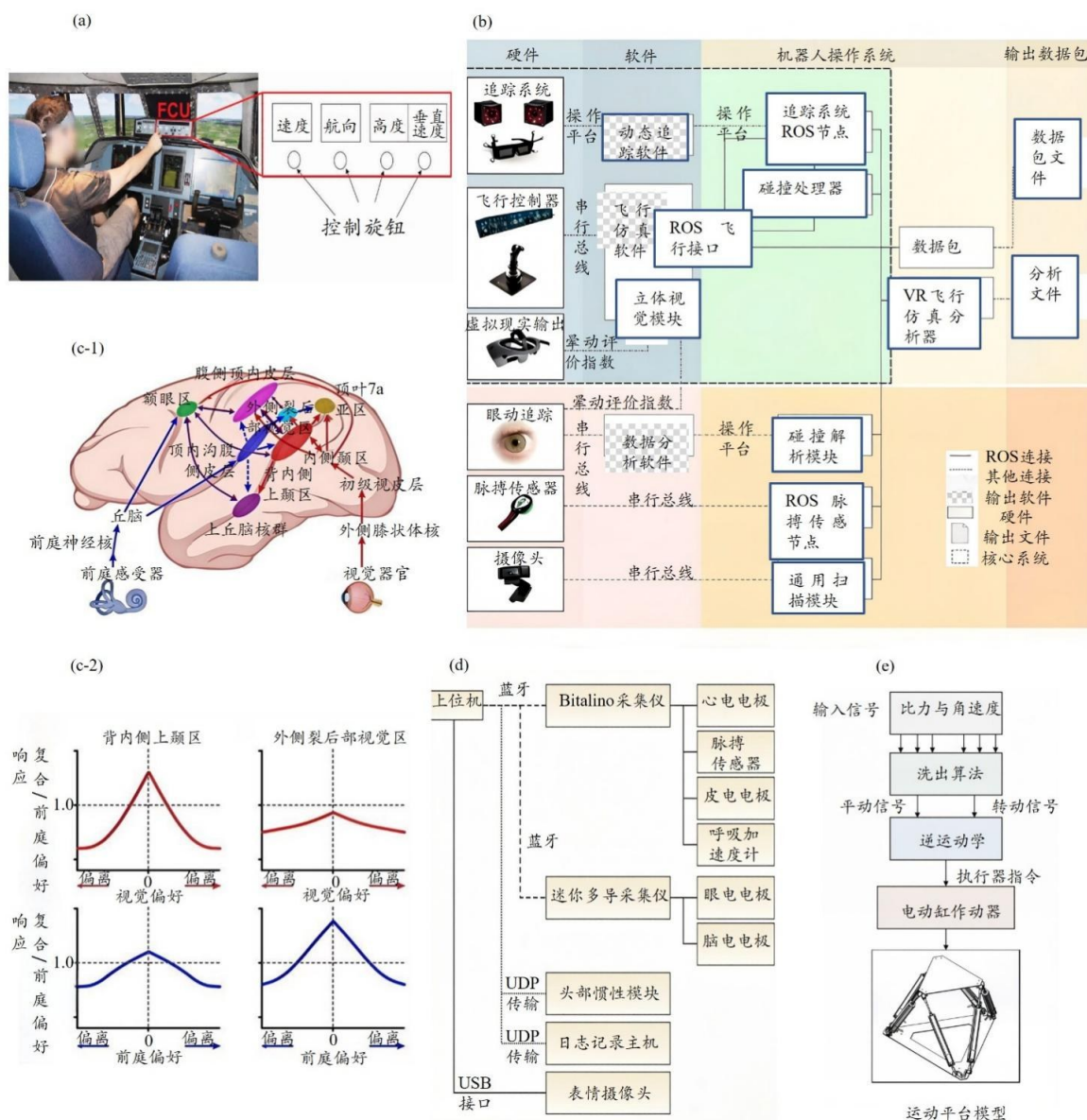
在洗出算法优化与仿真验证方面,国内外学者开展了深入的探索。王辉等^[15]针对飞行模拟器洗出算法开展了优化设计与仿真研究,通过改进滤波器结构和参数设置,有效提升了运动提示的逼真度和平台工作空间利用率;刘伟超和王辉^[102]

将多目标进化算法 MOEA/D 应用于参数优化,使相位延迟降低 3.5 s、工作空间利用率优化 54.6%; Allerton^[5]指出,现代飞行模拟器的运动系统通过六自由度平台与视觉、听觉系统的紧密同步,可提供高度逼真的运动体验。

3.3.2 虚拟现实集成与训练效果评估

虚拟现实技术的集成正在为飞行模拟器带来新的验证手段与应用场景。Oberhauser 和 Dreyer^[14]研究表明,虚拟现实飞行模拟器可作为高成本

硬件模拟器的有效补充,加速设计迭代。此外, Cross 和 Ryley^[90]进一步指出,虚拟现实飞行模拟器能够为初始副驾驶培训提供循证训练方案,其研究结果为虚拟现实技术在飞行员培训中的监管认可提供了实证支持。上述成果表明,融合机理模型与数据驱动方法、结合多目标优化与虚拟验证技术,是提升飞行模拟器运动平台逼真度的有效途径。



(a) 基于功能性近红外光谱技术的飞行员工作负荷实时状态估计^[88], (b) 集成眼动追踪与生理数据采集的虚拟现实飞行模拟器验证平台^[14], (c-1)~(c-2) 不同频率下人体倾斜协调感知阈值与前庭眼动反射阈值特性^[99], (d) 自运动感知中视觉-前庭信号整合的贝叶斯推断机制^[100], (e) 基于干电极生理测量与机器学习的运动病分类方法^[53]

图4 运动逼真度评估方法与生理感知建模

Fig. 4 Method for evaluating motion realism and modeling physiological perception

综上所述,飞行模拟器运动平台的逼真度提升与生理感知模拟技术正处于从经验设计向数据驱动、从单一感官模拟向多模态融合的重要转型阶段。在逼真度评估方面,经典的结构模型与控制论方法逐步与基于生理信号、虚拟现实及机器学习的新方法融合;在体感模拟算法方面,人体感知阈值建模与视觉—前庭多模态交互机制为洗出算法优化提供了生理学依据;在系统集成方面,洗出算法优化验证与虚拟现实集成应用正不断拓展仿真验证的手段与场景。未来研究应重点关注基于学习的智能体感算法、精细化的生理感知建模以及主客观结合的逼真度评价体系,以推动飞行模拟器技术向更高逼真度、更强训练效果方向发展。

4 未来重点研究方向

随着航空训练需求的持续升级以及高等级飞行模拟器自主研制的迫切要求,飞行模拟器运动平台研究正处于从传统机构设计与经典控制向多学科交叉融合、从经验参数整定向数据与机理协同驱动的重要转型阶段。未来应重点推进以下方向的研究与实践:

1) 突破传统构型边界,创新冗余及混合驱动机构设计。六自由度Stewart平台的工作空间与刚度受限于固定拓扑,难以兼顾全包线内的大行程与高动态响应。串并联混合机构与冗余驱动已展现改善奇异性与提升刚度的潜力,但其动力学稳定性尚未系统验证^[55]。折纸启发的可折叠Stewart机构及球形轮驱动平台为紧凑化设计提供新思路^[54],需加强运动学建模与样机验证。针对不同训练场景,建立构型选择图谱,明确自由度与拓扑形式在运动能力、成本与复杂度之间的最优平衡。

2) 发展刚柔耦合动力学建模与在线辨识方法。现有刚体模型难以描述铰链间隙、关节摩擦、支链柔性及执行器非线性等耦合效应^[32]。应构建刚—柔—间隙—摩擦耦合的高保真动力学模型,将结构弹性变形与非线性摩擦系统纳入。发展基于非线性卡尔曼滤波或深度贝叶斯推断的参数在线辨识方法^[77],利用运行数据持续更新惯性参数与柔性刚度。凯恩方法与递归李群动力学为高效计算奠定基础^[73],未来需探索简化模型与高保真

模型的自适应切换策略。此外,刚柔耦合动力学建模的最终目标应服务于感知逼真度的量化提升,而非仅停留在力学精度层面。

3) 构建感知驱动型体感模拟算法,揭示多模态耦合机制。传统洗出算法未充分利用前庭—视觉—本体感觉的多通道融合特性^[99]。应构建以人体感知模型为核心的洗出策略,将感知误差直接纳入代价函数。模型预测控制与深度强化学习提供了可行的算法基础^[53,84]。建立个性化感知模型,通过阈值测试在线辨识个体参数^[94],适配不同飞行员特征。同时,建立多级逼真度评估框架^[87],融合客观指标与主观评分,形成可量化评级体系。

4) 强化标准化测试与数据共享,支撑自主可控发展。

国内高等级模拟器核心算法与架构仍依赖进口,根源在于缺乏自主测试标准与共享数据生态。亟需制定涵盖工作空间测量、动态响应测试^[103]、感知逼真度评价^[86]及安全冗余设计的行业标准,与国际规范技术对等。同时,建设公开的飞行模拟器运行数据集,收录典型机动下的平台位姿、传感器信号、飞行员生理响应及主观评分,为算法验证、模型辨识与跨平台对比提供基础支撑,加速向可计算、可优化、自主可控的智能化转型。

5 结束语

本文系统综述了飞行模拟器运动平台在结构设计、驱动技术、动力学建模与控制、运动逼真度与生理感知模拟等方面的研究进展。总体来看,六自由度Stewart平台仍是专业级模拟器的主流承载机构,结构—驱动—控制协同优化是提升综合性能的关键;建模与控制正朝高精度、高实时和智能化方向发展,逼真度评估与体感模拟则向数据驱动和多模态融合转变。面对高等级飞行模拟器自主研制的迫切需求,未来仍需围绕上述重点方向持续攻关,打通机械、控制、信息与认知科学的学科壁垒,构建从物理仿真到人因验证的完整技术链条,推动我国飞行模拟器运动平台实现自主创新与工程应用突破。

参考文献

- [1] 中国民用航空局. 2024年民航行业发展统计公报[R]. 北京:中国民用航空局, 2025.

- Civil Aviation Administration of China. Statistical bulletin on the development of civil aviation industry in 2024[R]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2025. (in Chinese)
- [2] Boeing. Pilot and technician outlook 2025—2044[R/OL]. [2026-06-11].
- [3] Alexandrov V, Belousova M, Lemak S, et al. Motion cueing algorithms for aircraft maneuvering under variable g-loads[J]. *Acta Astronautica*, 2025, 228: 306-320.
- [4] 黄晶, 宋宏川, 钟明华, 等. 飞行模拟器最新发展研究[J]. *飞航导弹*, 2019(1): 69-73.
- Huang Jing, Song Hongchuan, Zhong Minghua, et al. Research on the latest development of flight simulator[J]. *Aerodynamic Missile Journal*, 2019(1): 69-73. (in Chinese)
- [5] Allerton D J. The impact of flight simulation in aerospace[J]. *The Aeronautical Journal*, 2010, 114(1162): 747-756.
- [6] Dourado A O, Martin C A. New concept of dynamic flight simulator, Part I[J]. *Aerospace Science and Technology*, 2013, 30(1): 79-82.
- [7] Yu J Q, Wu D S, Jia X L. Integrating intelligent pilot modeling and fidelity metrics for optimization of motion cueing algorithms in flight simulator[C]// 2024 IEEE 6th international conference on civil aviation safety and information technology (ICCASIT). Hangzhou, China: IEEE, 2024: 680-685.
- [8] 吴博. 基于定量反馈理论的飞行模拟器运动平台控制系统研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- Wu Bo. Research on flight simulator motion platform control system based on quantitative feedback theory[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007. (in Chinese)
- [9] Nahon M A, Ricard R, Gosselin C M. A Comparison of flight simulator motion-base architectures[C]// CEAS Symposium on Simulation Technology. US: CESA, 1995: 1-12.
- [10] 王敏, 张阳, 梁乾, 等. Stewart并联智能机器人发展现状 & 前沿应用[J]. *自然杂志*, 2025, 47(5): 360-372.
- Wang Min, Zhang Yang, Liang Qian, et al. Development status and frontier applications of Stewart parallel intelligent robots[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2025, 47(5): 360-372. (in Chinese)
- [11] 吴东苏. 轻型飞行模拟器运动平台先进控制技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- Wu Dongsu. Advanced control technology research of light flight simulator motion platform[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2007. (in Chinese)
- [12] Hong Z Y, Gao X, Liu J R, et al. Dynamic modelling and parameter identification of a 3-DOF flight simulator platform[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part K: Journal of Multi-body Dynamics*, 2019, 233(4): 968-978.
- [13] Plummer A R, Guinzio P S. Modal control of an electrohydraulic flight simulator motion system[C]// ASME 2009 Dynamic Systems and Control Conference. Hollywood, California, USA: 2010: 345-352.
- [14] Oberhauser M, Dreyer D. A virtual reality flight simulator for human factors engineering[J]. *Cognition, Technology & Work*, 2017, 19(2): 263-277.
- [15] 王辉, 朱道扬, 傅孝靖. 飞行模拟器洗出算法优化设计及仿真[J]. *系统仿真学报*, 2017, 29(2): 418-423, 429.
- Wang Hui, Zhu Daoyang, Fu Xiaojing. Optimization design and simulation of washout algorithm for flight simulator[J]. *Journal of System Simulation*, 2017, 29(2): 418-423, 429. (in Chinese)
- [16] Jiao Z X, Chen X H, Liu X C, et al. An experimental study on outer frame position control of hydraulic flight motion simulator with model compensation[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2022, 27(5): 3419-3428.
- [17] Grundy J G, Nazar S, O'Malley S, et al. The effectiveness of simulator motion in the transfer of performance on a tracking task is influenced by vision and motion disturbance cues[J]. *Human Factors*, 2016, 58(4): 546-559.
- [18] Monsarrat B, Gosselin C M. Workspace analysis and optimal design of a 3-leg 6-DOF parallel platform mechanism[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2003, 19(6): 954-966.
- [19] 王洪瑞. 液压六自由度并联机器人运动控制研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2003.
- Wang Hongrui. Research on kinematic control of hydraulic parallel robot with six degrees of freedom[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2003. (in Chinese)
- [20] 尹航, 杨烨峰, 赵岩, 等. 二自由度飞行姿态模拟器自整定控制器设计[J]. *电机与控制学报*, 2018, 22(4): 105-112.
- Yin Hang, Yang Yefeng, Zhao Yan, et al. Self-tuning controller design for a 2-DOF flight attitude simulator[J]. *Electric Machines and Control*, 2018, 22(4): 105-112. (in Chinese)
- [21] 任立伟, 班晓军, 吴奋, 等. 二自由度飞行姿态模拟器的模糊强化学习控制[J]. *电机与控制学报*, 2019, 23(11): 127-134.
- Ren Liwei, Ban Xiaojun, Wu Fen, et al. Fuzzy learning controller design of 2-DOF flight attitude simulator[J]. *Electric Machines and Control*, 2019, 23(11): 127-134. (in Chinese)
- [22] Abro G E M, Abdallah A M. Observer-driven LQR and FOLQR control for enhanced stability of underactuated 2-DOF helicopter[J]. *Instrumentation*, 2025, 12(1): 1-12.
- [23] 李丽, 刘超, 赵苓. 带有迟滞非线性气动运动模拟平台自抗扰轨迹跟踪控制[J]. *液压与气动*, 2022, 46(5): 159-166.
- Li Li, Liu Chao, Zhao Ling. Active disturbance rejection trajectory tracking control for pneumatic motion simulation

- platform with hysteresis nonlinearity[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2022, 46(5): 159-166. (in Chinese)
- [24] 顾云鹭, 史锋, 孟庆箐. 带独立约束支链的三自由度并联平台结构误差分析[J]. 机械设计与研究, 2025, 41(5): 107-112, 118.
Gu Yunlu, Shi Feng, Meng Qingqing. Structural error analysis of a 3-DOF parallel platform with independent constraint branches[J]. Machine Design & Research, 2025, 41(5): 107-112, 118. (in Chinese)
- [25] Zhang H Q, Fang H R. Stiffness characteristics analysis of a novel 3-DOF parallel kinematic machine tool[J]. International Journal of Engineering and Technology, 2018, 10(4): 346-354.
- [26] Chen Z M, Song J K, Li N, et al. Design and dynamics modeling of a novel 2R1T 3-DOF parallel motion simulator[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2023, 45(4): 234.
- [27] 程佳, 王宣银, 李强, 等. 4TPS-PS并联四自由度电动平台的受力特性研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2009, 41(1): 108-112.
Cheng Jia, Wang Xuanyin, Li Qiang, et al. Kinetostatic characters of parallel 4-DOF platform with 4TPS-PS structure[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2009, 41(1): 108-112. (in Chinese)
- [28] 张骁, 王培俊, 张利斌, 等. 混联四自由度汽车驾驶模拟平台的运动仿真与研究[J]. 机械制造与自动化, 2017, 46(2): 78-80.
Zhang Xiao, Wang Peijun, Zhang Libin, et al. Simulation and research on a 4-DOF hybrid motion vehicle driving simulation platform[J]. Machine Building & Automation, 2017, 46(2): 78-80. (in Chinese)
- [29] Forgó Z, Tolvaly-Roca F. Kinematic characterization of a novel 4-DoF parallel mechanism with modular actuation[J]. Robotics, 2026, 15(1): 13.
- [30] Shao C L, Li C W, Hu Y, et al. A practice of hybrid real-time compensation strategy for motion control of a heavy-load and high-speed 6-DOF parallel platform[J]. Mechanism and Machine Theory, 2025, 214: 106099.
- [31] 唐美, 张俊祥, 冉益民, 等. 六自由度液压运动平台的分析与研究[J]. 舰船科学技术, 2020, 42(5): 170-175.
Tang Mei, Zhang Junxiang, Ran Yimin, et al. Analysis and research of six degrees of freedom hydraulic motion platform[J]. Ship Science and Technology, 2020, 42(5): 170-175. (in Chinese)
- [32] 杨小龙. 六自由度并联机器人运动学、动力学与主动振动控制研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2018.
Yang Xiaolong. Research on kinematics, dynamics and active vibration control of six-DOF parallel robots[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2018. (in Chinese)
- [33] Becerra-Vargas M, Morgado Belo E. Dynamic modeling of a six degree-of-freedom flight simulator motion base[J]. Journal of Computational and Nonlinear Dynamics, 2015, 10(5): 051020.
- [34] Wei M Y, Fang S A, Liu J W. Design and implementation of a new training flight simulator system[J]. Sensors, 2022, 22(20): 7933.
- [35] Lukianov P V, Kabanyachyi V V. Mathematical model of stable equilibrium operation of the flight simulator based on the Stewart platform[J]. Aviation, 2023, 27(2): 119-128.
- [36] Li G, Li Y, Weng S F, et al. Design and simulation of a novel 6-DOF hybrid mechanism motion platform for pose adjustment of heavy equipment[J]. Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Mechanical Engineering, 2023, 47(3): 1055-1078.
- [37] 周昌春, 方跃法, 叶伟, 等. 6-RRS超冗余驱动飞行模拟器的性能分析[J]. 机械工程学报, 2016, 52(1): 34-40.
Zhou Changchun, Fang Yuefa, Ye Wei, et al. Performance analysis of 6-RRS over-redundant actuation flight simulator[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(1): 34-40. (in Chinese)
- [38] Chen M Y, Lu J S. High-precision motion control for a linear permanent magnet iron core synchronous motor drive in position platform[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2014, 10(1): 99-108.
- [39] 李亦豪, 张志利, 李向阳, 等. 特种车辆模拟驾驶训练中六自由度平台控制研究[J]. 系统仿真学报, 2021, 33(11): 2681-2690.
Li Yihao, Zhang Zhili, Li Xiangyang, et al. Research on six degrees of freedom platform control in special vehicle simulated driving training[J]. Journal of System Simulation, 2021, 33(11): 2681-2690. (in Chinese)
- [40] Wei M Y. Design and implementation of inverse kinematics and motion monitoring system for 6DoF platform[J]. Applied Sciences, 2021, 11(19): 9330.
- [41] Gan J Q, Long J R, Ge M F. Design of a 3DOF XYZ bi-directional motion platform based on Z-shaped flexure hinges[J]. Micromachines, 2022, 13(1): 21.
- [42] 齐思宁, 李强. 多自由度压电纳米定位平台控制技术研究现状[J]. 计测技术, 2023, 43(6): 8-19.
Qi Sining, Li Qiang. Research status of control technologies for multi-DOF piezoelectric nano-positioning platform[J]. Metrology & Measurement Technology, 2023, 43(6): 8-19. (in Chinese)
- [43] 朱华, 刘卫东, 赵淳生. 变体飞行器及其变形驱动技术[J]. 机械制造与自动化, 2010, 39(2): 8-14, 125.
Zhu Hua, Liu Weidong, Zhao Chunsheng. Morphing aircraft and its morph-driving techniques[J]. Machine Building & Automation, 2010, 39(2): 8-14, 125. (in Chinese)
- [44] Lee S M, Son H. Improvement of design and motion control for motion platform based on spherical wheels[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(5):

- 2427-2433.
- [45] Chen X H, Liu X C, Li X L, et al. Modeling, control and experimental investigation of horizontal hydraulic flight motion simulator[J]. *Mechatronics*, 2023, 91: 102950.
- [46] He J F, Jiang H Z, Tong Z Z. Modal control of a hydraulically driven redundant actuated fully parallel mechanism[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2017, 23(10): 1585-1592.
- [47] Plummer A R. Model-based motion control for multi-axis servohydraulic shaking tables[J]. *Control Engineering Practice*, 2016, 53: 109-122.
- [48] Liu T, Ding J C, Xu J Y, et al. Design and dynamics analysis of three-degree-of-freedom kinematic mechanism for helicopter attitude simulation [J]. *Scientific Reports*, 2025, 15: 7463.
- [49] 乔建飞, 丁问司. 电静液直驱系统的六自由度平台及运动控制[J]. *液压与气动*, 2025, 49(5): 110-117.
Qiao Jianfei, Ding Wensi. 6-DOF platform and motion control for electro-hydrostatic direct drive system[J]. *Chinese Hydraulics & Pneumatics*, 2025, 49(5): 110-117. (in Chinese)
- [50] Huang C, Li P Y, Luo R R, et al. The electro-hydraulic mix-drive cantilever arm platform (EMCAP) for general technology research in remote handling for Tokamak[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2024, 204: 114507.
- [51] 段学超, 仇原鹰, 段宝岩. 柔性支撑Stewart平台动力学建模与轨迹跟踪控制[J]. *系统工程与电子技术*, 2009, 31(4): 895-900.
Duan Xuechao, Qiu Yuanying, Duan Baoyan. Dynamical modeling and trajectory following control of the flexible supporting Stewart platform[J]. *Systems Engineering and Electronics*, 2009, 31(4): 895-900. (in Chinese)
- [52] Xie B H, Dai S L. Robust terminal sliding mode control on SE(3) for Gough-Stewart flight simulator motion platform with payload uncertainty [J]. *Electronics*, 2022, 11(5): 814.
- [53] Tong Y, Zhou H Y, Wu Z, et al. Model predictive control based washout algorithm design for flight simulator upset prevention and recovery training [J]. *Aerospace*, 2023, 10(10): 886.
- [54] Kalafat M A, Sevinç H, Samankan S. Design of a foldable origami-inspired 6-DoF Stewart mechanism[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2024, 38(3): 1429-1438.
- [55] Petrašinović M D, Grbović A M, Petrašinović D M, et al. Real coded mixed integer genetic algorithm for geometry optimization of flight simulator mechanism based on rotary Stewart platform [J]. *Applied Sciences*, 2022, 12(14): 7085.
- [56] 叶鹏达, 尤晶晶, 仇鑫, 等. 并联机器人运动性能的研究现状及发展趋势[J]. *南京航空航天大学学报*, 2020, 52(3): 363-377.
- Ye Pengda, You Jingjing, Qiu Xin, et al. Status and development trend of motion performance in parallel robot [J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2020, 52(3): 363-377. (in Chinese)
- [57] Wang L, Zhang J W, Zhang D. A review on reconfigurable parallel mechanisms: Design, analysis and challenge[J]. *Engineering*, 2025, 47: 100-116.
- [58] Ding X B. Determination of the largest collision-free and singularity-free workspaces for spatially isotropic Stewart platforms[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2024, 135(11): 5213-5234.
- [59] Nag A, Bandyopadhyay S. Singularity-free spheres in the position and orientation workspaces of Stewart platform manipulators [J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2021, 155: 104041.
- [60] 马建明. 飞行模拟器液压Stewart平台奇异位形分析及其解决方法研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2010.
Ma Jianming. Analysis of singular configuration and research of its solving method of the hydraulic STEWART platform of flight simulator[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2010. (in Chinese)
- [61] Zhou W Y, Chen W Y, Liu H D, et al. A new forward kinematic algorithm for a general Stewart platform[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 2015, 87: 177-190.
- [62] Yang F F, Tan X J, Wang Z, et al. A geometric approach for real-time forward kinematics of the general Stewart platform[J]. *Sensors*, 2022, 22(13): 4829.
- [63] Liu M Z, Gu Q X, Yang B, et al. Kinematics model optimization algorithm for six degrees of freedom parallel platform [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(5): 3082.
- [64] Zhu H Z, Xu W X, Huang J, et al. Graph-geometric message passing via a graph convolution transformer for FKP regression[J]. *Science China Information Sciences*, 2024, 67(12): 222202.
- [65] Ghorbani L, Omurlu V E. Neural networks based real time solution for forward kinematics of a 6×6 UPU flight simulator[J]. *Intelligent Service Robotics*, 2022, 15(5): 611-626.
- [66] 刘小平, 曾海, 张立杰, 等. 基于粒子滤波的Stewart平台正运动学求解[J]. *光学精密工程*, 2025, 33(23): 3691-3701.
Liu Xiaoping, Zeng Hai, Zhang Lijie, et al. Solution for forward kinematics of Stewart platform based on particle filter [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2025, 33(23): 3691-3701. (in Chinese)
- [67] Zhao J S, Sun X C, Wei S T. Kinematics and statics of the Gough-Stewart platform [J]. *Applied Sciences*, 2023, 13(18): 10150.
- [68] Müller A, Kumar S, Kordik T. A recursive lie-group formulation for the second-order time derivatives of the inverse

- dynamics of parallel kinematic manipulators[J]. *IEEE Robotics and Automation Letters*, 2023, 8(6): 3804–3811.
- [69] Dasgupta B, Mruthyunjaya T S. A Newton-Euler formulation for the inverse dynamics of the Stewart platform manipulator[J]. *Mechanism and Machine Theory*, 1998, 33(8): 1135–1152.
- [70] Kalani H, Rezaei A, Akbarzadeh A. Improved general solution for the dynamic modeling of Gough-Stewart platform based on principle of virtual work[J]. *Nonlinear Dynamics*, 2016, 83(4): 2393–2418.
- [71] Ardakani Kamali A, Akbari H, Namazian P, et al. Dynamic modeling of double segment redundant Gough-Stewart hybrid manipulator based on the principle of virtual work[C]//2024 12th RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM). Tehran, Iran: Islamic Republic of IEEE, 2024: 752–758.
- [72] 辛建, 徐振邦, 杨剑锋, 等. 基于6维并联机构的空间微振动模拟器动力学分析及测试[J]. *机器人*, 2015, 37(5): 581–587.
Xin Jian, Xu Zhenbang, Yang Jianfeng, et al. Dynamic analysis and test of a space micro-vibration simulator based on 6-dimensional parallel mechanism[J]. *Robot*, 2015, 37(5): 581–587. (in Chinese)
- [73] Liu M J, Li C X, Li C N. Dynamics analysis of the Gough-Stewart platform manipulator[J]. *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, 2000, 16(1): 94–98.
- [74] Jiao J, Wu Y, Yu K P, et al. Dynamic modeling and experimental analyses of Stewart platform with flexible hinges[J]. *Journal of Vibration and Control*, 2019, 25(1): 151–171.
- [75] 李鹭扬, 吴洪涛, 朱剑英. Gough-Stewart平台高效动力学建模研究[J]. *机械科学与技术*, 2005, 24(8): 887–889.
Li Luyang, Wu Hongtao, Zhu Jianying. An efficient method for dynamic modeling of Gough-Stewart platforms[J]. *Mechanical Science and Technology*, 2005, 24(8): 887–889. (in Chinese)
- [76] Wu P D, Xiong H G, Kong J Y. Dynamic analysis of 6-SPS parallel mechanism[J]. *International Journal of Mechanics and Materials in Design*, 2012, 8(2): 121–128.
- [77] 李远慧, 程志林, 田体先. 六自由度并联平台惯性参数辨识方法[J]. *机械设计与制造*, 2024(6): 305–308, 314.
Li Yuanhui, Cheng Zhilin, Tian Tixian. Inertial parameter identification method of six-degree-of-freedom parallel platform[J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2024(6): 305–308, 314. (in Chinese)
- [78] Zhou Y J, She J H, Wang F, et al. Disturbance rejection for Stewart platform based on integration of equivalent-input disturbance and sliding-mode control methods[J]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 2023, 28(4): 2364–2374.
- [79] Nguyen M H, Dao H V, Ahn K K. Extended sliding mode observer-based high-accuracy motion control for uncertain electro-hydraulic systems[J]. *International Journal of Robust and Nonlinear Control*, 2023, 33(2): 1351–1370.
- [80] Huang Y Z, Pool D M, Stroosma O, et al. Incremental nonlinear dynamic inversion control for hydraulic hexapod flight simulator motion systems[J]. *IFAC-PapersOnLine*, 2017, 50(1): 4294–4299.
- [81] Song Y B, Tian W J, Tian Y L, et al. Calibration of a Stewart platform by designing a robust joint compensator with artificial neural networks[J]. *Precision Engineering*, 2022, 77: 375–384.
- [82] Wu D S, Gu H B. Adaptive sliding control of six-DOF flight simulator motion platform[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2007, 20(5): 425–433.
- [83] Safeena M K, Ramesh Kumar P, Jiji K S. Control of Stewart platform using adaptive smooth integral sliding mode algorithm[J]. *ISA Transactions*, 2025, 156: 99–108.
- [84] Kong Y G, Wang Y L, Wang Y R, et al. Deep reinforcement learning trajectory tracking control for a six-degree-of-freedom electro-hydraulic Stewart parallel mechanism[J]. *Eng*, 2025, 6(9): 212.
- [85] Asadi H, Lim C P, Mohammadi A, et al. A genetic algorithm-based nonlinear scaling method for optimal motion cueing algorithm in driving simulator[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2018, 232(8): 1025–1038.
- [86] 赵国昌, 周文藻. 飞行模拟器逼真度评估方法研究进展[J]. *机床与液压*, 2020, 48(23): 176–183.
Zhao Guochang, Zhou Wenzao. Research development of fidelity evaluation methods for flight simulator[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2020, 48(23): 176–183. (in Chinese)
- [87] Jiang X, Chen X F, Jiao Y Y, et al. Objective evaluation of motion cueing algorithms for vehicle driving simulator based on criteria importance through intercriteria correlation (CRITIC) weight method combined with gray correlation analysis[J]. *Machines*, 2024, 12(5): 344.
- [88] Gateau T, Durantin G, Lancelot F, et al. Real-time state estimation in a flight simulator using fNIRS[J]. *PLoS One*, 2015, 10(3): e0121279.
- [89] 孙瑞山, 汪苧. 飞行模拟器环境下飞行员视觉特征[J]. *北京航空航天大学学报*, 2013, 39(7): 897–901.
Sun Ruishan, Wang Ning(Zhu). Visual features of pilot based on Markov chain under flight simulator[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2013, 39(7): 897–901. (in Chinese)
- [90] Cross J I, Ryley T. Assessing evidence-based training in a collaborative virtual reality flight simulator[J]. *The Aeronautical Journal*, 2025, 129(1332): 261–281.
- [91] Li Y, Zhang S, Wu Y. Handling qualities assessing of SVO-based eVTOL aircraft through EMG and eye data[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2025: 8–19.
- [92] 季瑞童, 高振兴, 张琳, 等. 基于TCN-LSTM与层次化注

- 意力机制的机组疲劳预测[J]. 南京航空航天大学学报(自然科学版), 2025, 57(6): 1212-1221.
- Ji Ruitong, Gao Zhenxing, Zhang Lin, et al. Fatigue prediction for flight crews using TCN-LSTM with hierarchical attention mechanism [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics (Natural Science Edition), 2025, 57(6): 1212-1221. (in Chinese)
- [93] 刘双, 完颜笑如, 庄达民, 等. 基于注意资源分配的情境意识模型[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(8): 1066-1072.
- Liu Shuang, Wanyan Xiaoru, Zhuang Damin, et al. Situational awareness model based on attention allocation [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2014, 40(8): 1066-1072. (in Chinese)
- [94] Kraft E, He P, Rinderknecht S. Development and evaluation of a threshold-based motion cueing algorithm[J]. Vehicles, 2021, 3(4): 636-645.
- [95] Haburcakova C, Lewis R F, Merfeld D M. Frequency dependence of vestibuloocular reflex thresholds[J]. Journal of Neurophysiology, 2012, 107(3): 973-983.
- [96] Springer K, Gattringer H, Bremer H. Towards washout filter concepts for motion simulators on the base of a Stewart platform[J]. Pamm, 2011, 11(1): 955-956.
- [97] 王辉, 陈学森. 飞行模拟器六自由度运动平台的仿真研究[J]. 机械科学与技术, 2012, 31(5): 778-782.
- Wang Hui, Chen Xuesen. Simulating six-DOF motion platform of flight simulator[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2012, 31(5): 778-782. (in Chinese)
- [98] Lemes R C, Souza M M, Belo E M, et al. Latency on a Stewart platform using washout filter[J]. The Aeronautical Journal, 2018, 122(1252): 1003-1019.
- [99] Liu J, Zeng F. The neural mechanisms of visual and vestibular interaction in self-motion perception[J]. Biology, 2025, 14(7): 740.
- [100] Yoshioka N, Takeuchi H, Shu Y Z, et al. Combined method comprising low burden physiological measurements with dry electrodes and machine learning for classification of visually induced motion sickness in remote-controlled excavator [J]. Sensors, 2024, 24(19): 6465.
- [101] Asif U, Iqbal J. Modelling, control and simulation of a six-dof motion platform for a flight simulator[J]. International Journal of Modelling and Simulation, 2011, 31(4): 1-15.
- [102] 刘伟超, 王辉. 基于运动试验平台的 MOEA/D 改进洗出算法仿真及试验[J]. 重庆大学学报, 2023, 46(1): 125-136.
- Liu Weichao, Wang Hui. Simulation and experiments of MOEA/D improved washout algorithm based on motion test platform [J]. Journal of Chongqing University, 2023, 46(1): 125-136. (in Chinese)
- [103] 李婷, 崔超雄, 任宁, 等. 飞行模拟机远程鉴定系统研究[J]. 测控技术, 2021, 40(7): 46-50, 56.
- Li Ting, Cui Chaoxiong, Ren Ning, et al. Remote qualification system of flight simulator[J]. Measurement & Control Technology, 2021, 40(7): 46-50, 56. (in Chinese)

(编辑:马文静)