

文章编号: 1674-8190(2021)01-072-07

船身式水陆两栖飞机起降飞行仿真研究

王峥华, 段旭鹏, 程志航, 孙卫平

(中航通飞研究院有限公司 总体部, 珠海 519040)

摘要: 水陆两栖飞机地面和水面起降特性需要满足适航规章的要求, 有必要在飞机方案的优化设计过程中建立准确的计算分析方法开展评估, 以保证飞机方案的适航符合性、降低设计更改风险。基于滑行艇水面滑行动力学分析方法、地面起落架多体动力学建模方法及 Matlab/Simulink 仿真环境, 分别建立某船身式水陆两栖飞机水面、地面起降的飞行仿真模型, 数学模型中包含飞机本体飞行力学模型、水动力模型或起落架模型, 通过对算例飞机水面和地面起飞过程开展飞行仿真, 得到飞机各运动状态变量、起落架参数、水动力等的时间历程, 并与飞行试验、水池试验数据进行对比分析。结果表明: 所建立的船身式水陆两栖飞机地面、水面飞行仿真方法达到了型号设计的精度要求, 仿真结果与试验试飞结果吻合得较好。

关键词: 水动力模型; 水陆两栖飞机; 起落架模型; 飞行仿真

中图分类号: V212.1

文献标识码: A

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2021.01.009

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Take-off and Landing Flight Simulation of Amphibious Aircraft

WANG Zhenghua, DUAN Xupeng, CHENG Zhihang, SUN Weiping

(General Design Department, AVIC General Research Institute Co., Ltd., Zhuhai 519040, China)

Abstract: For amphibians aircraft, ground and water handling characteristics should meet the requirements of airworthiness regulations, and an accurate computation analysis method should be established to carry out the evaluation during the optimization design process of the aircraft scheme, so as to ensure the airworthiness compliance of the aircraft scheme and reduce the risk of design change. Based on the sliding boats hydrodynamic analyzing methods, landing gear system multi-body dynamic modeling technology and Matlab/Simulink simulation environment, the mathematical flight simulation models of flying boat in water and on the ground are built respectively. The time history of various motion state variables, undercarriage parameters, and hydrodynamic forces of the aircraft are obtained after the simulation. Finally, a contrastive analysis of the taking-off process between the simulation results and experimental data is made. The results show that the ground and water flight simulation method is consistent with test data of the amphibious aircraft, can achieve the accuracy requirement of the aircraft design.

Key words: hydrodynamic model; amphibious aircraft; landing gear model; flight simulation

收稿日期: 2020-02-16; 修回日期: 2020-06-06

通信作者: 王峥华, wang_zh010@aliyun.com

引用格式: 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.

WANG Zhenghua, DUAN Xupeng, CHENG Zhihang, et al. Take-off and landing flight simulation of amphibious aircraft[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2021, 12(1): 72-78, 90. (in Chinese)

0 引言

水陆两栖飞机可以利用船身在水面上起飞着水,在陆上机场使用专门设计的起落架完成地面起降。日本和俄罗斯等国发展了 US-1、US-2、Be-200 等成熟的大型水陆两栖飞机,在该类型飞机地面、水面操纵特性的适航验证方面建立了完整的技术体系、积累了丰富的设计经验。我国在建立水陆两栖飞机起降数学模型并应用到型号方案优化设计、地面和水面适航条款^[1]适航符合性计算评估等方面的研究尚不完善,与国外存在着一定的差距。以往开展地面和水面操纵特性的适航符合性验证工作直到研发试飞阶段才能开展,如果试飞结果表明不满足适航条款要求,再尝试修改不同的设计方案以满足适航要求,这会付出巨大的时间代价和经济成本^[2]。此外,飞机起降阶段的时间占总飞行时间的 6%,事故率却占到了 80% 以上,可见起降阶段的飞行安全性研究不容忽视,建立较高精度的水陆两栖飞机不同介质起降的数学模型具有重要意义。

水陆两栖飞机水动力的数学建模方面,远不及气动力模型研究得深入和成熟,目前针对船体水动力数学建模的方法通常为近似计算公式,主要有:① Savitsky 半理论半经验水动力计算方法。D. Savitsky^[3]基于滑行平面假设提出了水动力、水动力矩的计算方程,并对侧舷浸湿面积、喷溅浸湿面积、喷溅阻力等进行了逐步改进,提高了该方法计算水作用力的估算精度。② ЦАГИ 法^[4]。ЦАГИ 方法与 Savitsky 方法的区别在于采用了不同的浸湿面积修正方法。苏联中央空气动力学与水动力学研究院采用平板假设计算浸湿面积、升力、纵倾角,提出了棱形艇升力和力矩方程,该方法对滑行艇起滑阶段水动力计算精度较高;董文才等^[5]提出了一种 ЦАГИ 法结合 RANS 方程的计算方法进一步提高了水阻力计算精度。③ 二维切片理论方法。近似将船体水线以下水流变化等效成无数个二维楔形面冲击水面过程中产生的水流运动,作用在船体的总水作用力等于所有二维平面流体作用力的总和。J. A. Keuning^[6]使用该方法建立了不规则波浪上滑行艇六自由度非线性数学模型;K. Gramé^[7]进一步改进该方法,在模型中增加相关修

正算子以提高数学模型对俯仰角运动的计算精度;朱迎谷等^[8-9]基于二维切片理论和 Savitsky 水动力计算方法开展了船身型水上无人机起飞过程的纵向非线性数学建模和自动控制律设计研究;段旭鹏等^[10]针对水上飞机复杂外形船体,利用计算流体力学技术对船体切片数值积分的方法,分析了水面起飞滑行过程中的水动力特性。

水陆两栖飞机的起落架不同于常规陆基飞机,主起落架需在水面运行时收于水线之上,造成了起落架结构高度远高于一般陆基飞机;大长宽比的船身又使得起落架主轮距较小。飞机地面运行时由机体、起落架支柱、机轮以及道面等多个刚体和柔性体组成了多体系统^[11]。国外, R. George 等^[12]、D. H. Klyde 等^[13]、W. S. Pi 等^[14]分别对起落架地面运动进行建模和仿真,并已应用于起落架工程设计优化、地面操纵特性分析之中。国内,张明等^[15]建立了综合飞机本体、前轮转弯、防滑刹车的地面运动数学模型,仿真研究了地面匀速转弯和滑跑刹车的动态响应;詹家礼^[16]和韩纪军等^[17]分别在 ADAMS、LMS Virtual Lab 软件中建立了水陆两栖飞机的起落架系统结构动力学仿真模型,进行了地面滑跑仿真分析;刘海良等^[18-19]利用建立的地面运动数学模型,通过人机闭环数字飞行仿真评估了民用飞机地面操纵特性的适航符合性。

在上述研究成果的基础上,本文从某大型水陆两栖飞机适航符合性分析、水面控制律设计等工程应用的实际需求出发,利用与上述研究不同的建模方法,分别建立该型飞机的水动力数学模型和起落架数学模型;联立飞机本体六自由度飞行力学模型分别开展水面、陆地的起降飞行仿真,并利用仿真计算得到的飞机运动参数与水池试验、飞行试验结果进行对比分析。

1 水动力模型

基于某大型水陆两栖飞机水池试验^[20]测量的水动力阻力、水动力升力、浮力等水动力分量(如图 1 所示),建立静水滑行中的纵向水动力数学模型。浮力和浮心的计算方法主要基于阿基米德定律^[21],文中不再列出其具体公式。

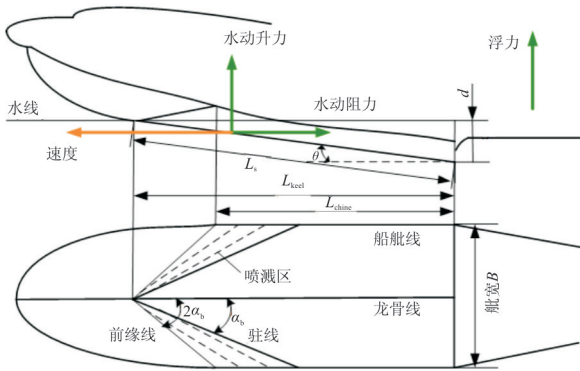


图 1 船体水面运动的关键参数和受力

Fig. 1 Hull parameters and forces

1.1 水动升力

水动升力与气动升力产生机理相似,均与动压、浸润面积和升力系数相关。水陆两栖飞机船体水动升力的计算表达式^[4]为

$$L_w = \frac{1}{2} \rho_w V^2 S C_{L_w} = \rho_w V^2 \lambda B^2 \frac{0.35 \pi \theta_b}{1 + 1.4 \lambda} \quad (1)$$

式中: ρ_w 为水的密度; V 为飞机速度; S 为浸湿面积, $S = \lambda B^2$; B 为舢宽; C_{L_w} 为水动升力系数; θ_b 为纵倾角; λ 为浸湿长宽比。

$$\lambda = \frac{L_{wet}}{B} = \frac{(L_{keel} + L_{chine})}{2B} = \frac{d}{B \sin \theta_b} - \frac{\tan \beta_b}{2 \pi \tan \theta_b} \quad (2)$$

式中: L_{wet} 为船身平均浸湿长度; L_{keel} 为龙骨浸湿长度; L_{chine} 为船舷线浸湿长度; d 为断阶下缘点在水线以下的垂直距离; β_b 为船体斜升角。

1.2 水动阻力

本文所建立的水动阻力 D_w 模型为

$$\begin{cases} D_w = D_{iv} + D_s = (1+k)D_f + D_s \\ D_s = 0.5 \rho_w V^2 A_{as} C_{fs} \\ D_f = \frac{1}{2} \rho_w V_1^2 S \frac{0.075}{(\lg Re - 2)^2} \end{cases} \quad (3)$$

式中: D_{iv} 为黏性阻力; D_s 为喷溅阻力; $(1+k)$ 为形状因子,仅与船体形状有关,参考与两栖飞机船体相似的船模试验结果^[22], k 修正为 0.195。

船体底部平均水流速度 V_1 小于飞机的前进速度 V ,与机身底部的平均动压 P_d 有关,根据伯努

利方程可得:

$$\begin{cases} V_1 = V \left(1 - \frac{2P_d}{\rho_w V^2} \right)^{0.5} \\ P_d = \frac{L_w}{\lambda B^2 \cos \theta_b} \end{cases} \quad (4)$$

喷溅区面积 A_{as} ^[3]:

$$\begin{cases} A_{as} = L_{ws} B = \frac{B^2}{4 \sin 2\alpha_b \cos \beta_b} \\ \alpha_b = \arctan \left(\frac{\pi \tan \theta_b}{2 \tan \beta_b} \right) \end{cases} \quad (5)$$

喷溅阻力系数 C_{fs} ^[3]:

$$\begin{cases} C_{fs} = \frac{1.328}{\sqrt{R_{Nws}}} & (R_{Nws} < 1.5 \times 10^6) \\ C_{fs} = \frac{0.074}{5 \sqrt{R_{Nws}}} - \frac{4800}{R_{Nws}} & (R_{Nws} \geq 1.5 \times 10^6) \end{cases} \quad (6)$$

其中, $R_{Nws} = \frac{VL_{ws}\rho_w}{\mu_w}$ 。

式中: L_{ws} 为喷溅特征长度; μ_w 为水的黏性系数, $\mu_w = 0.001002 \text{ kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$ 。

1.3 水动作用点

水陆两栖飞机在水面滑行时船体底部的水动压力分布如图 2 所示,70%左右的水动压力分布在滑行面与水面相遇的部位,本文参考苏联中央空气动力学与水动力学研究院的相关研究成果,其水动压力中心的计算公式^[4]为

$$l_p = \frac{3}{4} L_{keel} + 0.08 \frac{\lambda^{0.865}}{\sqrt{Fr_B}} L_{keel} \quad (7)$$

式中: l_p 为水陆两栖飞机船体断阶到水动压力中心的距离;傅汝德数 $Fr_B = V/\sqrt{gB}$ 。

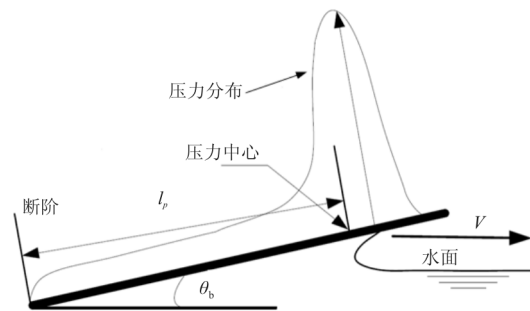


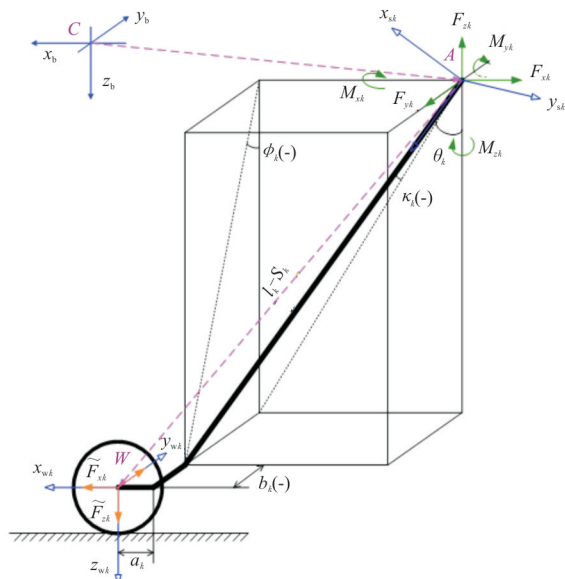
图 2 船体底部的水动压力分布

Fig. 2 Water pressure distribution on bottom of the hull

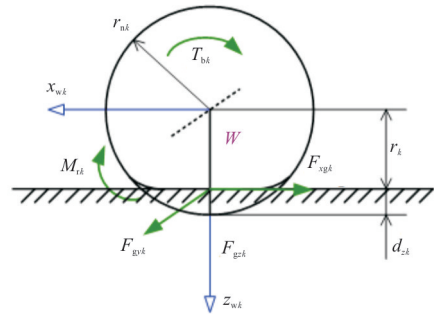
2 起落架模型

在某大型水陆两栖飞机支柱式起落架建模的过程中,将机轮、起落架支柱、缓冲器活塞等非弹性支撑质量的参考点定位于机轮轴心处,具有 3 个方向的平动自由度,机轮绕轮轴具有 1 个转动自由度。起落架缓冲器沿轴向具有 1 个平动自由度,同时可沿航向和侧向发生弯曲变形,但不考虑支柱扭转变形。机体等弹性支撑质量为具有 3 个方向的平动和 3 个转动自由度的刚体,其参考点位于飞机的重心处。

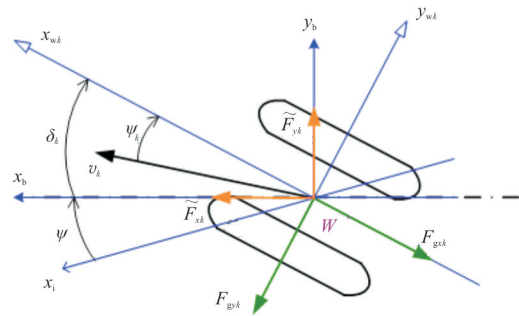
起落架模型中支柱和机轮的相关参考系和矢量方向如图 3 所示。机体重心 C 为机体参考系 Ox_b, y_b, z_b 的原点,受到的外力包括:飞机的重力、气动力和气动矩、发动机拉力及其力矩、由该起落架在机身上的连装点 A 处传递给机体的作用力 $[F_{xk} F_{yk} F_{zk}]$ 和力矩 $[M_{xk} M_{yk} M_{zk}]$ 。机轮轮心 W 为机轮参考系 Ox_{wk}, y_{wk}, z_{wk} 的原点,机轮受到的外力和外力矩包括:地面作用于其与机轮接触面的力 $[F_{gzk} F_{gzk} F_{gzk}]$ 和力矩 $[M_{gzk} M_{gzk} M_{gzk}]$ (该力和力矩经过轮胎和轮毂传递至轮心 W 处)、刹车力矩 T_{bk} 、起落架支柱对机轮的反作用力 $[\tilde{F}_{xk} \tilde{F}_{yk} \tilde{F}_{zk}]$ 和力矩 $[\tilde{M}_{xk} \tilde{M}_{yk} \tilde{M}_{zk}]$ 。



(a) 第 k 个起落架的支柱



(b1) 侧视图



(b2) 俯视图

(b) 第 k 个起落架的机轮

图 3 起落架模型中的各参考系及矢量方向

Fig. 3 Reference frames and direction of vector in the landing gear model

第 k 个起落架支柱在机轮轴线参考点 W 处作用于机轮的力^[14]为

$$\begin{bmatrix} \tilde{F}_{xk} \\ \tilde{F}_{yk} \\ \tilde{F}_{zk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{xk} \\ F_{yk} \\ F_{zk} \end{bmatrix} + \mathbf{L}_{\text{SBk}}^T \begin{bmatrix} -C_{xk} \Delta \dot{x}_{sk} \\ -C_{yk} \Delta \dot{y}_{sk} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

式中: \mathbf{L}_{SBk} 为由体轴参考系 Ox_b, y_b, z_b 转换到第 k 个起落架缓冲器参考系 Ox_{sk}, y_{sk}, z_{sk} 的转换矩阵; $C_{xk} = 2\zeta_k \sqrt{K_{xk} m_k}$, 为第 k 个起落架支柱的航向阻尼系数; $C_{yk} = 2\zeta_k \sqrt{K_{yk} m_k}$, 为第 k 个起落架支柱的侧向阻尼系数 (ζ_k 为第 k 个起落架的支柱结构阻尼比)。

3 仿真模型

根据上述水动力模型、起落架模型,结合飞机本体飞行力学仿真模型^[23] (包含由风洞试验数据建立的气动力模型、发动机拉力特性模型等),利用 MATLAB/Simulink 所建立的仿真软件 (如图 4 所示),可以分别实现地面和水面起降阶段的实际飞行任务仿真。

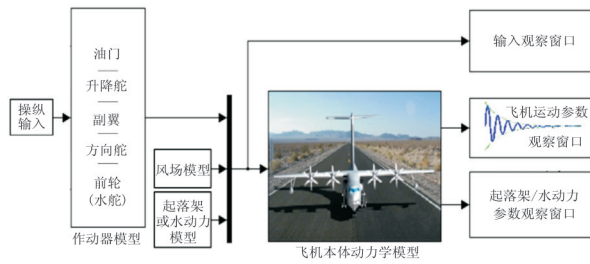


图 4 飞行仿真的结构框图

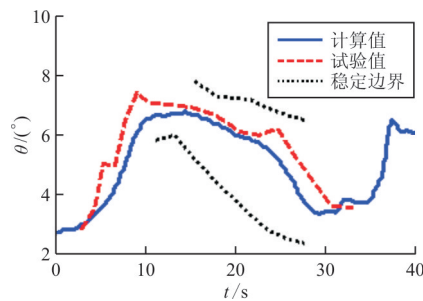
Fig. 4 Block diagram of flight simulation

4 仿真算例

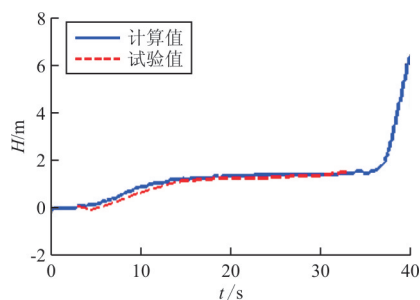
4.1 水面起飞

本算例计算某大型水陆两栖飞机以给定起飞构型(质量 53 500 kg、重心 26%MAC、襟翼 20°)从平静水面以速度 1.5 m/s、起飞功率起飞的过程,升降舵舵面预置在水池试验偏度 -15°。初始配平计算的俯仰角为 2.74°,与水池试验得到的初始浮态 2.75°基本相同。

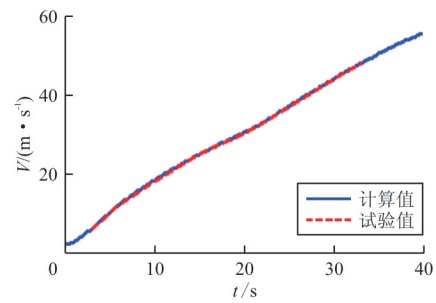
水陆两栖飞机水面起飞过程仿真结果如图 5 所示,“计算值”为利用水动力数学模型进行飞机飞行仿真的结果,“试验值”为飞机在相同状态下的水池试验值,其中水动阻力和水动升力的试验值是基于水池缩比模型试验数据换算为实机尺寸后的结果。



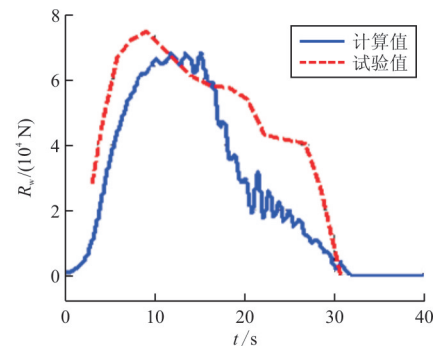
(a) 纵倾角



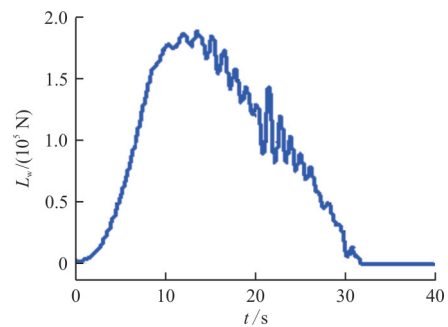
(b) 高度



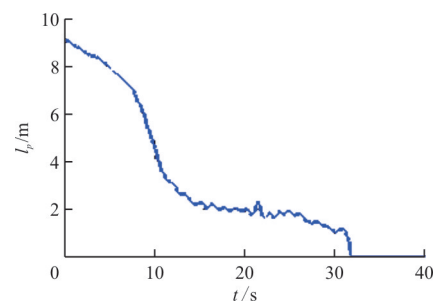
(c) 速度



(d) 水动阻力



(e) 水动升力



(f) 水动作用点

图 5 水面起飞仿真结果与水池试验对比

Fig. 5 Comparison of take-off on the water simulation result and water tunnel result

从图 5 可以看出:飞机在 12 s 时达到纵倾峰,峰值约为 6.2°,31 s 时飞机离水;水面滑行过程中

俯仰角处于水池试验稳定边界之内,不会出现不稳定运动,符合适航规范的要求;质心高度和速度的变化规律与试验值相同;水动阻力的峰值与试验值误差为 8.7%;水动力作用点在起飞过程中逐渐向船体断阶移动,也符合理论规律。

4.2 地面起飞

利用建立的地面仿真模型,计算大型水陆两栖飞机在某次给定起飞构型(质量 48 000 kg、重心 25.5%MAC、襟翼 20°、起飞功率)从速度 5 m/s 开始滑跑起飞的过程,舵面输入与飞行员操纵时间历程相同。初始配平状态为俯仰角 0.3°、质心高度 4.37 m。水陆两栖飞机地面起飞过程仿真结果如图 6 所示。

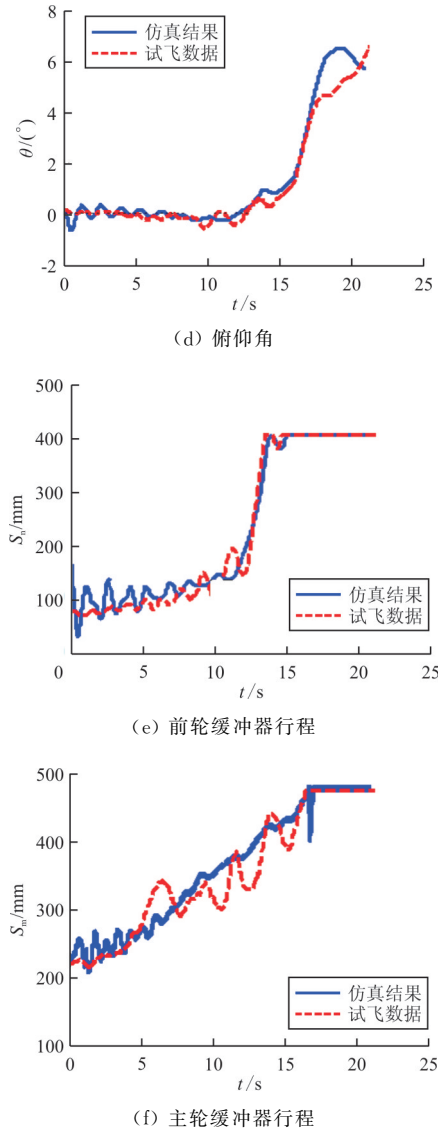
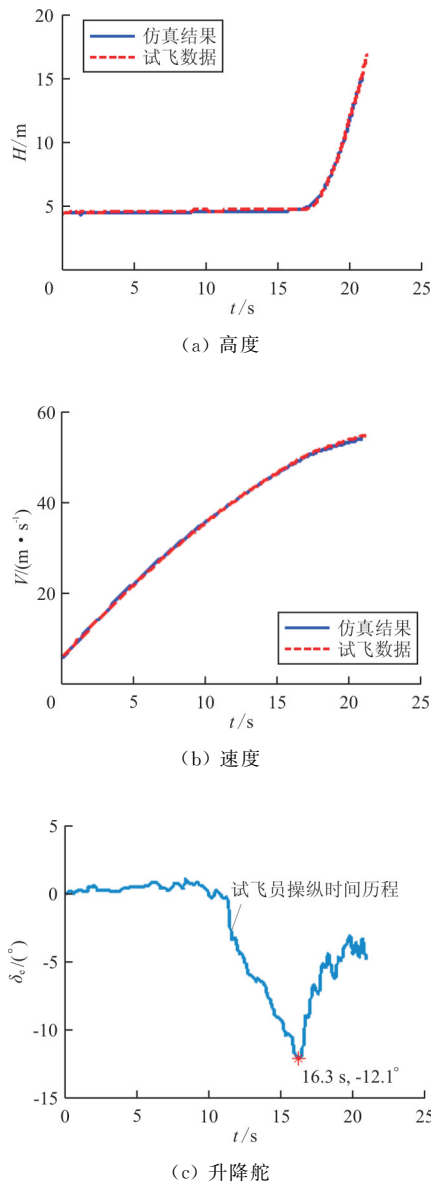


图 6 地面起飞仿真结果与试飞数据对比
Fig. 6 Comparison of take-off simulation result and flight test result on the ground

从图 6 可以看出:在滑跑、拉杆、离地起飞过程中,飞机的速度、高度、俯仰角等关键运动参数与试飞数据吻合较好;在未拉杆之前随着速度增加,全机升力增大使飞机呈现低头趋势,该现象符合一般起飞过程的俯仰角变化趋势,飞机没有前翻倾向能够满足适航条款的要求;仿真计算的前主轮缓冲器的行程变化初始滑跑段有一定误差,但也基本落在试飞数据振荡曲线之内。

5 结 论

(1) 本文建立的某水陆两栖飞机水面运动的数学仿真方法,可以分析水陆两栖飞机在水面滑行

过程中受力和运动状态变量的特征,与水池试验结果的对比表明,该方法能够反映飞机水面滑行过程中运动参数的变化规律及过程,较为准确地捕捉到了纵倾峰出现的状态,可以用于型号飞机水面操纵特性条款的适航符合性计算分析、评估和改进飞机设计方案、水面控制律设计。

(2) 本文建立的某水陆两栖飞机地面运动飞行力学仿真数学模型考虑了缓冲器、轮胎、支柱的动力学和运动学关系。采用数字飞行仿真可以得到飞机地面起飞过程中飞机本体运动状态变量以及起落架各特征参数的时间历程,该地面仿真方法的计算结果与飞机试飞结果吻合得较好,达到了工程应用的精度要求,目前已应用于型号飞机地面操纵特性的适航符合性评估、地面控制律设计、工程模拟器仿真、指导飞行员试飞操纵程序等方面。

在本文研究工作的基础上,可以继续开展波浪条件下的水动力数学建模,进一步扩大水面仿真的应用范围。

参考文献

- [1] 中国民用航空局. 运输类飞机适航标准: CCAR-25-R4[S]. 北京: 中国民用航空局, 2011.
Civil Aviation Administration of China. Airworthiness standard of transport aircraft: CCAR-25-R4[S]. Beijing: CAAC, 2011. (in Chinese)
- [2] 谷卫岩. Y-12 飞机起飞操纵性能改进措施[J]. 飞行力学, 1994, 12(2): 65-69.
GU Weiyan. The improvement of Y-12 aircraft's takeoff and control performance[J]. Flight Dynamics, 1994, 12(2): 65-69. (in Chinese)
- [3] SAVITSKY D. Inclusion of whisker spray drag in performance prediction method for high-speed planing hulls[J]. Marine Technology, 2007, 44(1): 35-56.
- [4] 赵连恩, 谢永和. 高性能船舶原理与设计[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009.
ZHAO Lian'en, XIE Yonghe. The principle and design of high performance ships[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009. (in Chinese)
- [5] 董文才, 姚朝帮. 查洁法结合 RANS 方程的滑行艇阻力计算方法[J]. 上海交通大学学报, 2012, 46(8): 1223-1229.
DONG Wencai, YAO Chaobang. Study on method to calculate resistance of planing crafts by combination of "ЦАГИ" method and RANSE[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2012, 46(8): 1223-1229. (in Chinese)
- [6] KEUNING J A. The nonlinear behaviour of fast monohulls in head waves [D]. Delft, the Netherlands: Technische Universiteit Delft, 1994.
- [7] GRAME K. Improved time domain simulation of planing hulls in waves by correction of the near-transom lift[J]. International Shipbuilding Progress, 2005, 52(3): 201-230.
- [8] ZHU Yinggu, FAN Guoliang, YI Jianqiang. Modeling longitudinal aerodynamic and hydrodynamic effects of a flying boat in calm water[C]// Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Beijing: IEEE, 2011: 135-149.
- [9] 朱迎谷. 水上无人机建模与起飞控制研究[D]. 北京: 中国科学院大学, 2013.
ZHU Yinggu. Modeling and taking off control design for a unmanned flying boat[D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences, 2013. (in Chinese)
- [10] 段旭鹏, 孙卫平, 魏猛, 等. 水上飞机起飞历程的水动力特性研究[J]. 航空工程进展, 2019, 10(1): 94-101.
DUAN Xupeng, SUN Weiping, WEI Meng, et al. Investigation on the hydrodynamics of seaplane takeoff process [J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2019, 10(1): 94-101. (in Chinese)
- [11] CURREY N S. Aircraft landing gear design: principles and practices[M]. Reston: AIAA, 2002.
- [12] GEORGE R, DOYLE J R. A review of computer simulations for aircraft-surface dynamics[J]. Journal of Aircraft, 1999, 36(3): 584-590.
- [13] KLYDE D H, MYERS T T, NANCY M, et al. Identification of the dominant ground handling characteristics of a navy jet trainer: AIAA-2000-3903[R]. USA: AIAA, 2000.
- [14] PI W S, YAMANE J R, SMITH M J C. Generic aircraft ground operation simulation: AIAA-86-0989 [R]. USA: AIAA, 1986.
- [15] 张明, 聂宏. 飞机地面转弯和刹车响动力学分析[J]. 航空学报, 2008, 29(3): 616-621.
ZHANG Ming, NIE Hong. Dynamics analysis of aircraft ground steering and braking response[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2008, 29(3): 616-621. (in Chinese)
- [16] 詹家礼. 大型水陆两栖飞机起落架方案设计及相关技术研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2010.
ZHAN Jiali. Conceptual design of landing gear and research on relative technologies for large-scale amphibious aircraft [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2010. (in Chinese)
- [17] 韩纪军, 许锋, 聂宏. 大型水陆两栖飞机地面滑跑稳定性分析与仿真[J]. 航空计算技术, 2012, 42(1): 20-23.
HAN Jijun, XU Feng, NIE Hong. Analysis and simulation of a large amphibian aircraft taxiing[J]. Aeronautical Computing Technique, 2012, 42(1): 20-23. (in Chinese)
- [18] 刘海良, 王立新. 基于数字虚拟飞行的民用飞机纵向地面操稳特性评估[J]. 航空学报, 2015, 36(5): 1432-1441.
LIU Hailiang, WANG Lixin. Assessment of longitudinal ground stability and control for civil transport aircraft based on virtual flight testing methodology[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2015, 36(5): 1432-1441. (in Chinese)
- [19] 刘海良, 王立新. 基于数字虚拟飞行的民机侧风着陆地面航向操稳特性评估[J]. 北京航空航天大学学报, 2018, 44(3): 516-525.

- [14] IBRAHIM A S, EVGENY P P, DAVID J E. Experimental and numerical investigation of rotating bladed disk forced response using underplatform friction dampers[J]. ASME Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2008, 130: 042503-1-11.
- [15] 宁智轶, 杜少辉, 韩清凯, 等. 模拟叶片气激及涂层阻尼减振有效性研究[J]. 航空发动机, 2013, 39(5): 14-17.
NING Zhiyi, DU Shaohui, HAN Qingkai, et al. Study on validity of air-excited vibration and coating vibration damping of simulation blade[J]. Aeroengine, 2013, 39(5): 14-17. (in Chinese)

作者简介:

罗莉(1983—),女,硕士,工程师。主要研究方向:发动机强度与试验,复合材料。

黄大永(1988—),男,硕士,工程师。主要研究方向:发动机强度与试验。

(编辑:马文静)

(上接第 71 页)

- [12] 刘宇, 刘永超. 航电系统安全性分析工具设计与研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2017(3): 10-16.
LIU Yu, LIU Yongchao. Design and research on safety analysis tool for avionics system[J]. Civil Aircraft Design & Research, 2017(3): 10-16. (in Chinese)
- [13] SAE. Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment; SAE ARP4761 [S]. US: Society of Automobile Engineers Inc., 1996.
- [14] FAA. System design and analysis: FAA-AC 25.1309-1B [S]. US: FAA, 2002.

作者简介:

张辉(1985—),男,硕士,工程师。主要研究方向:民用飞机通信导航系统集成和验证、系统安全性分析。

陈世浩(1979—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:民用飞机通信导航监视系统设计、集成和验证。

(编辑:马文静)

(上接第 78 页)

- LIU Hailiang, WANG Lixin. Evaluation of directional ground stability and control characteristics in crosswind landing for civil airplane based on digital virtual flight[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2018, 44(3): 516-525. (in Chinese)
- [20] 黄淼, 廉滋鼎, 左仔滨, 等. 水陆两栖飞机模型水池波浪试验研究[J]. 航空科学技术, 2016, 27(1): 74-78.
HUANG Miao, LIAN Ziding, ZUO Zaibin, et al. Experimental study on motion response of a seaplane on waves[J]. Aeronautical Science Technology, 2016, 27(1): 74-78. (in Chinese)
- [21] 褚林塘. 水上飞机水动力设计[M]. 北京: 航空工业出版社, 2014.
CHU Lintang. Seaplane hydrodynamic design[M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2014. (in Chinese)
- [22] 盛振邦. 船舶原理[M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2019.
SHENG Zhenbang. The principle of ships[M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2019. (in Chinese)
- [23] 王峥华, 李超. 多发飞机着陆进场最小操纵速度人机闭环仿真[J]. 飞行力学, 2015, 33(1): 78-82.

WANG Zhenghua, LI Chao. Aircraft-pilot closed loop simulation of the minimum control speed during landing approach for multi-engine airplane[J]. Flight Dynamics, 2015, 33(1): 78-82. (in Chinese)

作者简介:

王峥华(1985—),男,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞行力学、飞行器设计。

段旭鹏(1980—),男,博士,高级工程师。主要研究方向:空气动力学、飞行器设计。

程志航(1983—),男,学士,工程师。主要研究方向:飞行力学、飞行器设计。

孙卫平(1964—),男,硕士,研究员。主要研究方向:飞行器设计。

(编辑:马文静)