

文章编号:1674-8190(2022)05-014-14

民用飞机水上迫降数值仿真方法研究进展

罗文莉,陈书涌,陈保兴

(上海飞机设计研究院 飞机结构强度工程技术所,上海 201210)

摘要: 水上迫降是飞机设计时必须考虑的一种应急着陆场景,总结水上迫降研究领域的数值仿真方法,能够为民用飞机设计中的水上迫降分析提供支撑。本文综述了国内外在民用飞机水上迫降数值仿真方法上的研究进展,主要包括面元法、有限体积法、光滑粒子水动力学法和有限元法;对这些方法的基本原理、发展过程和应用情况进行了归纳总结,对不同方法的适用性和优劣性进行了对比分析;通过对水上迫降数值仿真方法的分析,对数值仿真方法未来的研究方向提出了建议。

关键词: 民用飞机;水上迫降;数值仿真;入水冲击;流固耦合

中图分类号: V328

DOI: 10.16615/j.cnki.1674-8190.2022.05.02

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress of Numerical Simulation Methods for Civil Aircraft Ditching

LUO Wenli, CHEN Shuyong, CHEN Baoxing

(Aircraft Structure and Stress Division, Shanghai Aircraft Design and Research Institute, Shanghai 201210, China)

Abstract: Aircraft ditching is an emergency landing scenario that must be considered in aircraft design. Summarizing the research methods for the numerical simulation of ditching can provide the support for ditching analysis of civil aircraft design. The research progress of numerical simulation methods available for civil aircraft ditching are reviewed in this paper, which includes plane element method, finite volume method, smoothed particle hydrodynamic method and finite element method. The basic principles, development process and application situations of these methods are summarized, and the adaptability and superiority-inferiority of these methods are performed with contrastive analysis. By analyzing the numerical simulation methods of aircraft ditching, the future research direction of numerical simulation methods is proposed.

Key words: civil aircraft; ditching; numerical simulation; water impact; fluid-structure interaction

收稿日期:2021-09-28; 修回日期:2022-01-25

通信作者:罗文莉, luowenli@comac.cc

引用格式:罗文莉,陈书涌,陈保兴. 民用飞机水上迫降数值仿真方法研究进展[J]. 航空工程进展, 2022, 13(5): 14-27.

LUO Wenli, CHEN Shuyong, CHEN Baoxing. Research progress of numerical simulation methods for civil aircraft ditching[J]. Advances in Aeronautical Science and Engineering, 2022, 13(5): 14-27. (in Chinese)

0 引言

现代民用飞机的跨洋飞行越来越普遍,使得水上迫降成为飞机设计必须要考虑的一种应急着陆场景,各国民用飞机适航条款中对其都有明确的适航符合性验证要求^[1]。A. A. Patel等^[2]对20世纪60~90年代发生的水上迫降事故进行了统计分析,结果表明迫降时驾驶员的操作正确与否明显影响迫降后的生存率,而制定迫降操纵程序的重要前提就是对水上迫降性能的充分研究。

水上迫降分为有计划和无计划两种,有计划水上迫降指的是飞行机组有足够的准备时间,目前大多研究通常只针对有计划水上迫降。水上迫降时,飞机整体结构必须能够承受水上迫降过程中的载荷不发生解体等整体破坏形式,机体气密区结构能够承受水冲击局部压力载荷,以保证飞机拥有足够的漂浮时间用于应急撤离。

本文重点针对民用固定翼飞机水上迫降冲击动力学问题,首先通过概述水上迫降研究方法的发展历程,指出数值仿真方法具有逐渐代替试验和分析的趋势;然后对具体的仿真方法进行了阐述,系统地介绍了各类方法的应用现状,并就不同方法的优缺点进行了详细的对比分析;最后结合工程实际应用,指出需要重点关注的技术内容,以期为后续研究水上迫降问题的研究者提供参考。

1 水上迫降研究方法的发展历程

水上迫降可以分为进近、冲击、滑行和漂浮四个阶段,如图1所示。在进行飞机机体结构设计时,水冲击载荷的严重情况更受关注,因此研究重点和难点主要针对冲击和滑行阶段。

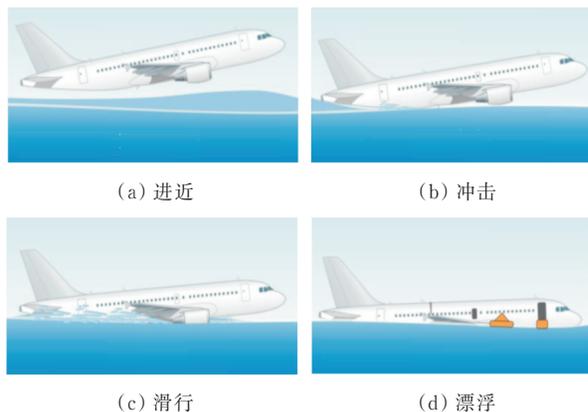


图1 水上迫降运动过程示意^[3]
Fig. 1 Ditching process^[3]

与陆地坠撞情况相比,水上迫降情况下的结构受力形式和响应存在显著差异。坠撞时的冲击力是由高质量惯性响应引起的,冲击力集中作用于高刚度的结构上如框和长桁,而水载荷作用在结构外表面即蒙皮上,然后传递至机体结构,并且和结构之间不断相互作用。剧烈的冲击载荷会导致机身蒙皮产生较大的局部变形^[4],被誉为“哈德逊河奇迹”的水上迫降事件(如图2所示)也印证了这一点。蒙皮破裂将严重影响结构吸收能量的效率,因此机身蒙皮的完整性十分重要。



图2 哈德逊河水上迫降事件^[4]
Fig. 2 Successful ditching on the Hudson River^[4]

冲击滑行过程中飞机受力如图3所示,除了气动力和重力以外,中后机身前半部受到水冲击力,机身尾部由于纵向曲率变化产生吸力,后机身入水深度增大后平尾上出现水载荷。由于初期的受力特点直接影响后续的运动过程,因此对迫降过程的准确分析计算是极具挑战的。

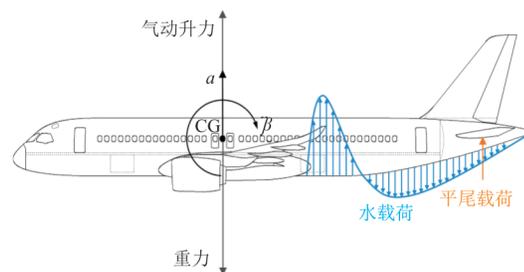


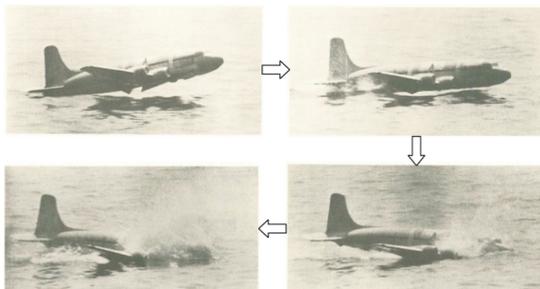
图3 飞机水上迫降过程中的受力
Fig. 3 Forces acting on aircraft during ditching

对于飞机水上迫降的性能研究方法大致可以分为三个阶段。第一阶段主要基于动量法等工程算法对入水冲击问题进行理论描述;第二阶段开始实施大量的模型试验对飞机水上迫降的具体性能开展研究;第三阶段数值仿真方法开始得到应用并逐渐趋于成熟,为深入分析迫降性能中的各种现象提供了可靠途径。

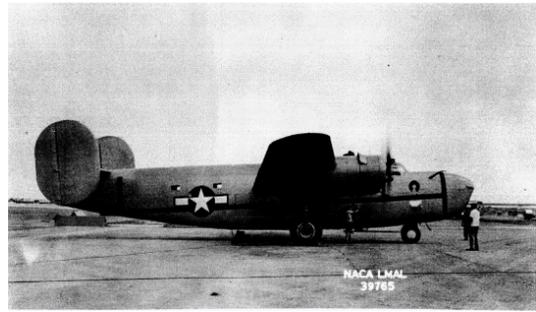
对于入水冲击问题的理论研究可以追溯到20

世纪二三十年代。T. Von Karman^[5]首次尝试假设流体的作用由附加质量代替,根据动量守恒推导出冲击压力;H. Wagner^[6]在此基础上考虑了水冲击过程中液体颗粒升高产生的飞溅,优化了冲击压力。入水冲击的理论研究在上述工作的基础上得到了广泛开展^[7-11],包括考虑非线性以及不同入水几何体、入水速度和入水角度的影响等。然而,这些理论研究通常集中于简单二维物体如二维楔形、平底以及圆筒形结构,忽略物体重力并且对流场进行较大程度的简化,没有考虑流体的黏性、压缩性、气垫效应等影响,对于三维外形复杂的飞机,入水冲击过程中水平速度远大于垂直速度,流体的黏性、压缩性和气垫效应不可忽略,因此理论研究无法直接用于研究飞机水上迫降问题。

20世纪40年代末开始,以NASA为代表的研究机构展开了一系列简单结构以及飞机的缩比模型试验^[12-15]甚至是真机迫降试验^[16],更直观且准确地描述、探究水上迫降问题,如图4所示。缩比模型试验通过对速度、下沉率、姿态、重量、重心、襟翼位置、海况等关键参数的综合试验,探索相应的全尺寸飞机的迫降性能。相比于早期主要依靠机械式仪器仪表进行数据记录,现代的试验中逐渐引入了光电数字系统,得到更精准数据的同时捕捉生成图像^[17]。然而设计、制造试验模型的过程仍然相对复杂,一次完整的水上迫降试验需要反复研究各种因素的影响,导致高昂的费用和时间成本。现阶段的测量方法尚且难以满足试验数据全方位且准确的采集要求,试验结果仍然难以精确复现。另外,缩比模型试验的尺寸效应使得模型运动过程始终与真实的飞机存在一定差异,且模型大多采用刚性结构,无法考虑由于较高的冲击载荷带来的结构柔性的影响。



(a) 迫降过程^[12]



(b) 真机模型^[16]

图4 水上迫降模型试验和真机试验
Fig. 4 Model test and real aircraft test of ditching

20世纪80年代中后期,随着计算机技术与计算流体力学、有限元软件的发展,数值仿真技术逐渐成为研究水上迫降问题的一条新思路,开始部分甚至完全代替了模型试验方法在水上迫降性能研究中的地位。相比理论分析和模型试验,数值仿真有着低成本、高效率、可重复性强的显著优点,能够适应各种复杂外形的物体,既不会因为现实条件而对设计参数如入水速度等有所限制,也不会因为过多的简化而忽略实际的流动现象。迫降的动态过程、流场变化以及压力响应能够直观地展现,另外还可以考虑真实结构柔性的影响。因此越来越多的研究人员通过数值仿真方法模拟飞机水上迫降过程,也有多位研究者对水上迫降数值仿真方面的研究进展进行了跟踪,例如刘沛清等^[18]、罗文莉^[19]概述了水上迫降仿真方法的具体应用;M. ANGHILERI等^[20]介绍了不同仿真方法在复材机身壁板入水冲击问题中的应用;童明波等^[21]则描述了各类飞行器包括固定翼飞机、水陆两栖飞机和直升飞机在水上迫降、水上漂浮、贮箱晃动和投汲水等结构水载荷问题中的研究进展。研究人员在研究过程中不断总结提炼,逐渐完善仿真方法,使之成为未来研究水上迫降问题的重要手段。

2 数值仿真方法

水上迫降问题本质上是一种入水冲击问题,同时涉及气、液、固三相耦合,包含了吸力、气穴、气垫和曝气等多种复杂现象。在冲击阶段尤其是冲击初期,飞机表面的流体具有强非线性特征,冲击载荷在时间和空间上均有明显的梯度,峰值可

以达到近十个大气压,并且沿机体表面快速移动。在工程应用中,需要准确获取飞机的受力特征,精确捕捉迫降过程中的运动姿态和液面变化。水上迫降时飞机处于着陆构型,襟缝翼位于放下位置,复杂的飞机外形增加了数值仿真的建模难度;民用飞机较高的柔性可以降低水载荷冲击峰值;有效平衡计算精度和效率从而满足工程应用,这些都是数值仿真方法面临的难点。

通过查询各类公开文献,应用较为广泛的仿真方法主要包括面元法、有限体积法、光滑粒子水动力学法和有限元法,本文对上述方法进行综述。

2.1 面元法

面元法由于原理简单、计算快捷,最早得到工程应用。该方法将飞机假设为刚体,同时忽略空气作用,重点研究水上迫降过程中的水冲击力。将物体表面离散成网格,用不同的平面或曲面代替物面,在每一个面元上进行计算,忽略各个面元之间的相互干扰。计算原理一般是基于动量守恒^[22-23]或势流理论^[24-25]等,假设在物体初始入水冲击的短暂时间内,惯性力占主导作用,认为流体无旋不可压,忽略重力和表面张力作用。

1990年,G. Farhad^[26]基于线性势流理论,使用面元法提出了一种模拟航天飞机水上迫降时周围空气和水流场的分析方法,称之为涡旋分离空气动力学(VSAERO)法,如图5所示。使用偶极面模拟自由表面,低阶面元模拟飞机表面,将远处来流分为上下两个区域,上部为无流动边界条件,通过分析获得水面升高后的飞机下表面触水区域。

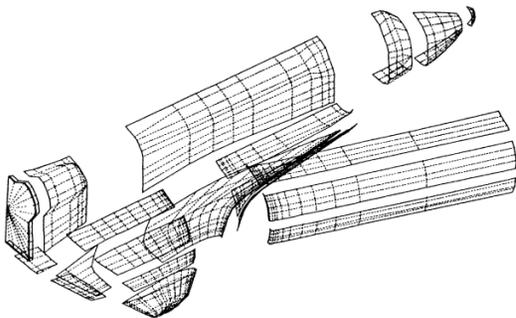


图5 面元法模拟航天飞机水上迫降^[26]

Fig. 5 Simulation of the space shuttle ditching by VSAERO^[26]

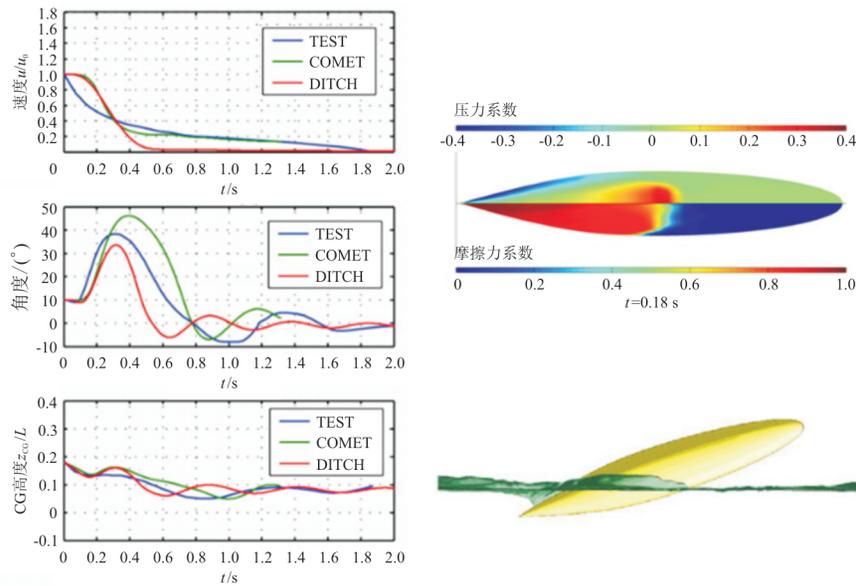
由于缺乏航天飞机迫降的试验数据,G. Farhad^[26]采用平板入水的试验数据和航天飞机的风

洞试验数据作为参考,分析得到的表面压力与试验数据具有较好的一致性,但由于该方法未考虑展向流动,因此外缘处的计算结果与试验数据相差较大。2001年,S. Vladimir等^[27]基于动量守恒原理采用面元法对福克614飞机的水上迫降压力、变形和漂浮特性开展研究,与模型试验中获得的压力数据对比表明,沿机身对称面底部的压力分布规律较为接近。

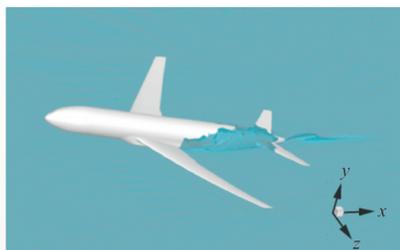
2.2 基于VOF的有限体积法

有限体积法(Finite Volume Method,简称FVM)将计算区域划分为一系列不同的单元即控制体,针对每一个控制体进行微分方程的体积分,再基于高斯公式将体积分转换为面积分,该方法广泛应用于流体力学领域。但水上迫降涉及到的流场包括气、液两相流体,因此还需要对自由表面流动进行捕捉。对自由表面的捕捉方法包括流体体积占比法(Volume of Fluid,简称VOF)、水平集(Level-Set)法和质点网格(Particle-in-Cell,简称PIC)法等。在研究飞机水上迫降问题中,最常用的界面捕捉方法是VOF法,该方法通过单元内的流体与网格的体积比来追踪自由面,当体积比在0~1之间时即为交界面单元。

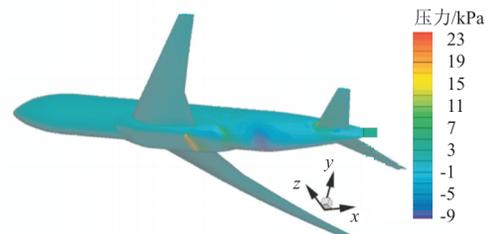
2006年,A. T. Wick^[28]使用Fluent软件对一种无人机垂直入海问题进行了研究,计算得到了无人机着水过程中的压强和加速度时间历程,计算结果与试验数据基本吻合,由于无人机垂直入水,气动力的作用影响较小,因此仅重点研究了不同下沉率的影响;2007年,O. Lindenau等^[29]使用了两种软件对飞机的水上迫降过程进行了模拟计算,分别是基于FVM和VOF法的COMET软件与基于动量法的混合程序DITCH。为了消除气动力的差异影响,在使用DITCH时,将通过COMET计算得到的机翼和尾翼的气动力导出作用在机身上,在DITCH中仅需对机身进行建模。O. Lindenau等^[29]研究了不同外形机身的着水情况,并将两种方法的计算结果与试验数据进行了对比,两种方法的计算结果均较为准确,其中COMET可以更直观地体现飞机入水过程中的水面运动和飞机表面压强分布,如图6所示。

图6 使用FVM和VOF模拟机身入水过程^[29]Fig. 6 Simulation of the fuselage entering water by FVM and VOF^[29]

2009年,贺谦等^[30]采用FVM和VOF法研究了水平速度、下沉率、俯仰角对迫降时飞机机身载荷的影响,结果表明机身表面压强的分布规律较为稳定,压强峰值随俯仰角和下沉率的增大而增大,但水平速度影响较小;2012年,Zhang T等^[31]模拟了一种支线客机的水上迫降过程,经过对比试验表明吸力对于飞机水上迫降的姿态角有着重要的影响,且空气模型是吸力产生的必要条件;屈秋林等^[32-34]详细地研究了尾吊高平尾、翼吊低平尾和翼身融合三种不同布局飞机的水上迫降特性,根据过载压力等动态响应确定最佳迫降俯仰角(如图7所示),研究指出,相比于高平尾布局飞机,较低的平尾具有抑制飞机过度上仰的作用,从而有利于减缓过载和局部压力,而翼身融合布局飞机在迫降中抬头剧烈,具有跳离水面的不稳定趋势,不利于迫降后的应急撤离。



(a) 模型



(b) 数值模拟

图7 一种翼吊低平尾布局飞机的水上迫降仿真^[34]Fig. 7 Simulation of a wing-hung and low-HTP airplane ditching^[34]

2016年,王丑丑等^[35]使用FLUENT软件模拟二维圆柱、三维椭圆和三维平板的入水冲击,将分析得到的冲击压力与试验数据进行对比,用以验证仿真方法;采用该仿真方法考虑六自由度运动,对一种简化翼身组合体的水上迫降进行了研究,重点分析了机身尾部吸力会使得迫降过程中飞机的俯仰角先增大后减小。

上述研究大部分集中于水上迫降过程中机体尾部产生的后体吸力,并认为吸力是俯仰角增大的主要原因,然而根据目前的型号设计经验,迫降初期的气动力也是促使飞机抬头的重要因素,前机身下表面和水面形成的气流阻滞区对机身下表面气动力的影响不可忽略,且精确模拟存在较高难度。此外,也有少部分关于波浪水面迫降的研

究。2019年,吴宗成等^[36]运用滑移动网格对飞机在波浪水面情况下的迫降进行了数值仿真,研究了相对波浪的迫降方向对冲击力的影响,根据冲击力峰值和姿态角响应,分析认为平行波浪传播方向迫降为最优,迎浪方向最差。

基于VOF的FVM数值仿真大多需使用网格捕捉飞机和计算域的运动,因此十分依赖于网格的构建。对于复杂外形,网格的生成费时费力,考虑结构变形时还需要采用动网格处理。传统的动网格技术通过网格变形和重构来模拟飞机和计算域的运动。其中重叠网格是将流场划分成几个相互重叠、嵌套的子区域,对不同区域独立生成网格,通过切割和搜索实现网格重组。切割时对网格进行标记,搜索时根据每一个标记的网格点寻找边界单元的最佳贡献单元。切割和搜索均需耗费大量时间,并且由于分区域划分,网格数量递增,增加了计算时间。变形网格法通常使用内外分区结构网格和非结构网格混合形式,其中内区采用结构网格和物体一起运动,保证物面附近网格质量不受运动影响,水气界面捕捉清晰;外区采用非结构网格,受到物体及内区网格的运动而产生拉伸或剪切变形。计算过程中水面相对计算域保持稳定高度,通过外区网格不断变形和重构实现对迫降过程的模拟。与重叠网格相似,变形网格也需要耗费较大的计算空间和计算成本。浸没边界法作为一种边界条件处理方法,通过在简单的背景网格下进行数值计算反映物体边界,降低了网格生成难度,因此可结合FVM进行仿真分析。但由于采用非贴体网格,对于复杂外形的物体,壁面附近的精度很难保证,通常需要在壁面附近采用极高的网格密度,大幅降低了计算效率,因此该方法目前仍主要用于简单二维物体入水研究^[37]。

区别于传统的动网格技术,2015年,Qu Qiulin等^[38]首次将整体运动网格应用于水上迫降问题的研究。该技术将水面绝对高度限制不变,使得整个流场的网格相对水面自由运动,从而避免了网格产生变形。研究中针对经典水上迫降模型试验^[13]进行了数值仿真,如图8所示,同时与文献[29]中的结果进行对比,由于考虑了平尾断裂和襟翼放下对气动力的影响,该方法得到的结果与试验数据的吻合度最高,同时也说明了迫降过程中气动力的显著影响。Qu Qiulin等^[38]还对VOF

的显示和隐式求解方法进行了研究,认为在关注冲击压力峰值时,应选择显式VOF与精细网格;而更关注宏观运动过程时,隐式VOF与相对粗糙的网格是更好的选择。此后,整体运动网格技术开始应用于入水冲击问题的研究^[39-41]。

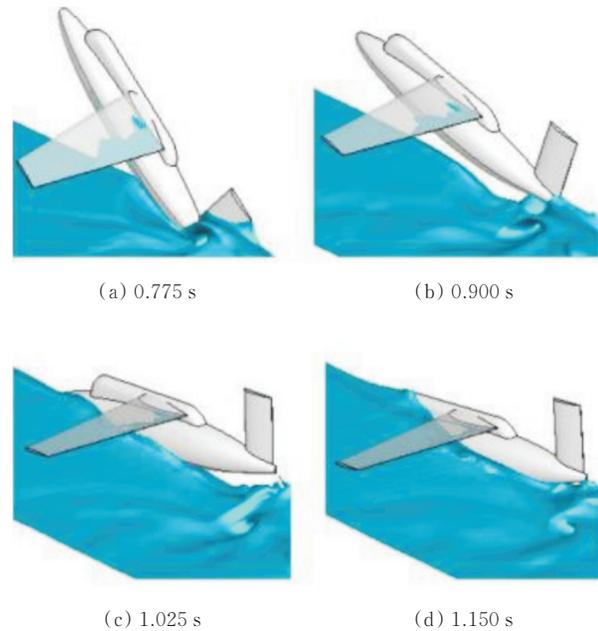


图8 采用整体运动网格法模拟水上迫降运动过程^[38]
Fig. 8 Global moving mesh method used in aircraft ditching simulation^[38]

2.3 光滑粒子流体动力学法

在研究复杂的三维水冲击问题中,如何确保高质量的网格是难点。在模拟水面的翻转、喷溅和大幅震荡时,网格会发生严重变形从而影响计算精度。采用动网格或整体运动网格法会导致计算量增加或者自由面的捕捉精度受影响,而无网格法为解决以上问题提供了一条途径。无网格法包括离散元(Discrete Element Method,简称DEM)法、无网格伽辽金(Element Free Galerkin,简称EFG)法、移动粒子半隐式法(Moving Particle Semi-implicit Method,简称MPSM)和光滑粒子流体动力学(Smoothed Particle Hydrodynamics,简称SPH)法等,在模拟自由表面破碎等高度变形问题中最常用的是SPH。SPH使用一系列粒子代替网格,由核函数定义相邻粒子的加权和,根据粒子之间的距离来加权每个粒子的贡献,通过核函数近似出所需的未知值。该方法最初利用了蒙特卡洛法中的抽样思想来解决三维开放空间中的天体物

理问题^[42],由于天体粒子的集体运动类似于流体运动,可以用经典牛顿流体动力学控制方程来模拟。J. J. Monaghan^[43-44]等、Liu M B等^[45]在原始SPH算法的基础上进行了改进,并尝试模拟自由表面的不可压缩流动,验证了该方法的稳定性与易用性。自此,SPH在冲击波模拟、水下爆炸仿真、高速碰撞模拟等领域得到了长足的发展^[46-47]。在航空航天领域,SPH被广泛地应用于鸟撞^[48]、水上迫降^[49]等流固耦合问题。

21世纪初期,欧盟著名的框架计划之一“CRAHVI”(Crashworthiness of Aircraft for High Velocity Impact)计划,重点研究高速撞击时飞机的抗撞击安全性,旨在开发可用于研究高速冲击问题的工具和方法。其中一项针对CN-235飞机水上迫降的研究主要由西班牙EADS-CASA公司和德国DLR合作开展^[50-52],SPH在其中得到了应用^[53],但根据应用中模拟和试验的对比结果显示该方法的误差较大。分析认为在水上迫降这一类以水平速度为主导的运动中,以本构方程为控制方程的SPH无法模拟出气穴效应和负压力,从而影响对运动姿态和冲击力的模拟。

为了精确模拟负压,研究者对SPH的控制方程进行了改进。2014年,P. Groenenboom等^[54]基于一种弱可压缩SPH再次对CN-235飞机水上迫降进行了模拟,在模拟尾部负压力时采用接触定义特性,即“惩罚应力”小于用户定义的分离应力时保持接触,从而实现了对运动状态的模拟更加接近试验结果(如图9所示),然而计算中未建立空气模型,仅采用简化的升阻力模型模拟气动力;2017年,Xiao T等^[55]开发了基于弱可压缩连续方程为控制方程的SPH,耦合六自由度运动方程,并使用一种虚拟粒子壁面边界处理方法模拟高压和负压,通过对经典水上迫降模型试验^[13]的模拟表明精度较高,能够模拟出机身底部的负压力以及由此产生的抬头运动,而后使用该方法对一种直升机的水上迫降特性进行了研究,如图10所示;此后,Cheng H等^[56]同样采用该方法研究了一种地效水翼艇的入水冲击过程,结果表明垂直速度对过载峰值的影响明显大于水平速度。在波浪水面迫降研究方面,2014年,张盛等^[57]采用SPH模拟三级波浪,建立了一个小型飞机的水上迫降模型,通过研究不同姿态角和起落架状态对迫降性能的影响,得到了起落架收起和12°俯仰角的最佳迫降状

态,但该方案并未经过相关试验验证。

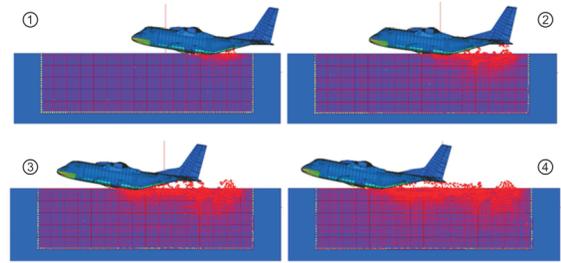


图9 基于SPH的CN-235飞机水上迫降模拟结果^[54]

Fig. 9 CN-235 aircraft ditching simulation results based on SPH^[54]

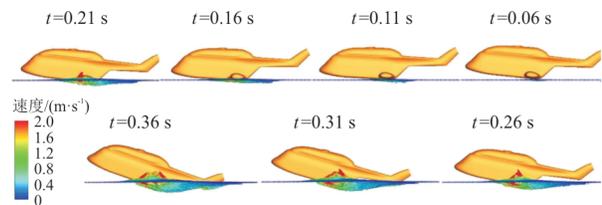


图10 基于SPH法的直升机水上迫降模拟结果^[55]

Fig. 10 Helicopter ditching simulation results based on SPH^[55]

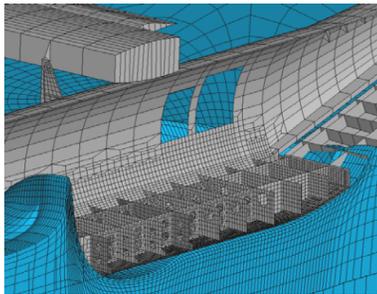
2.4 有限元法

上述方法中均假设飞机为刚体,忽略结构弹性的影响。然而实际迫降中,冲击载荷会使机体产生非线性结构变形,显著改变流体的边界条件,从而影响冲击载荷。有限元法(Finite Element Method,简称FEM)的使用引入了结构模型,使得模拟流固耦合成为可能。

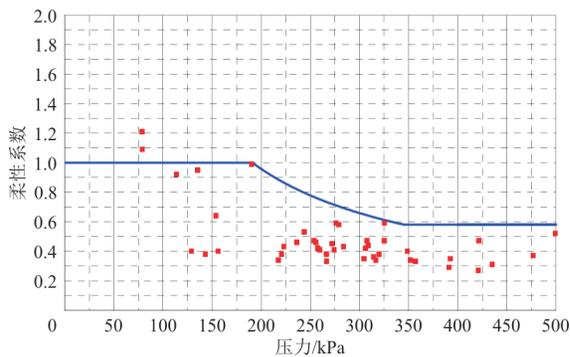
2.4.1 拉格朗日法

有限元法于20世纪50年代开始应用并解决飞机的结构力学问题,20世纪90年代开始逐渐用于解决流体力学问题。在水上迫降问题中,最早得到应用的是拉格朗日法。1994年,J. R. Brooks等^[58]基于LS-DYNA软件研究了阿波罗太空舱水上着陆时的动态响应并与缩比模型试验结果进行了对比。当时的LS-DYNA不具备流体计算功能,因此使用实心块来模拟流体单元,通过Gruneisen状态方程来模拟水的特性,同时对模型施加定常体积力模拟重力。仿真结果与试验结果的对比表明,仅在水冲击的前30~40ms较为接近,分析认为可能是冲击后期对于流体运动的模拟不够准确,因此建议在软件中增加计算流体的功能。此后有限元软件针对该问题进行了改进,可以同时进行流体和结构的计算分析,用于复杂外形三

维物体的水上迫降数值仿真,同时考虑水的压缩性,从而使得模拟流固耦合成为可能。1997年,G. Wittlin 等^[59]采用 FEM 基于 MSC/DYTRAN 和 DRI/KRASH 软件对直升机水上迫降问题进行了仿真,用于支持直升机的抗坠毁设计。在 2.3 节提到的“CRAHVI”计划中,FEM 也得到了大量的应用,R. Palacios 等^[60]采用有限元分析软件 PAM-CRASH 对结构柔性的影响进行了量化研究(如图 11 所示),通过建立刚性和柔性两种模型,对比水上迫降时模型受到的压力,推导出柔性系数与压力峰值之间的关系,结果表明在压力峰值 350 kPa 以上时,考虑柔性后压力峰值会显著降低至刚体模型的一半以下。



(a) 仿真模型



(b) 数值结果

图 11 考虑结构柔性的有限元仿真^[60]Fig. 11 Finite element simulation considering structural flexibility^[60]

2.4.2 ALE 法

用于描述连续介质力学的方法通常分为拉格朗日法和欧拉法。在拉格朗日法中,网格节点随流体质点的运动而运动,便于跟踪自由液面,但也因此适用于液体表面的小晃动问题,在涉及到液面大幅变形如飞机水上迫降的问题时,流体的大尺度变形会导致网格产生较大畸变,从而导致计

算偏差较大甚至无法计算。而在欧拉法中,网格节点始终固定,流体的变形在网格中完成,可以描述流体的急剧变化。但是由于网格与流体之间存在相对运动产生对流效应,并且固定边界和运动边界之间存在复杂的数学映射关系,计算过程中通常难以追踪自由液面。两种方法各有优劣,但都难以完美适用流固耦合问题。任意拉格朗日—欧拉(Arbitrary Lagrange Euler,简称 ALE)法结合了两者的优点,在固体域中采用拉格朗日描述,流体域则采用欧拉描述,而在流体与固体结构的交界面处则在每个点上设置流体与固体两种节点,分别对应不同的描述方式。由于在 ALE 中,计算网格可以独立运动,在简化界面处理问题的同时保证了计算所需的网格质量,因此 ALE 是近年来被普遍采用的方法。

2008年,H. Shoji 等^[61]开展了一半比例的全尺寸机身等直框段垂直入水试验,基于 LY-DYNA 软件使用 ALE 进行了模拟,并通过对比试验数据验证该方法的有效性,结果显示压力峰值吻合较好,但时间历程曲线相差较大,因此仅适用于估算机身蒙皮受到的冲击压力量级;2010年,贺谦等^[62]采用 ALE 研究了水平速度、下沉率、俯仰角对迫降时飞机机身载荷的影响,指出下沉率的影响最明显,该研究主要关注机身结构应力和变形,对迫降运动过程的描述较少,另外仿真方法也未经验证;2011—2014年,黄勇等^[63-64]、Hu W 等^[65]采用 LS-DYNA 和 MSC-DYTRAN 等软件使用 ALE 法分别对民用支线飞机和波音 777 的水上迫降进行了模拟,然而模拟得到入水初期运动姿态与试验相差较大,究其原因,一方面在于有限元分析软件对于气动力的模拟存在困难,另一方面,由于 ALE 结合了拉格朗日和欧拉法,因此计算结果的准确性依赖于耦合算法中参数的选择,而耦合算法中通过流体渗漏和接触刚度定义流体结构之间的相互作用力,在流体运动近似平行于固体表面时容易引起流体渗漏,导致流体压力和结构压力载荷不统一;2020年,王明振等^[66]提出了一种基于 S-ALE 的优化算法,结构对流场的作用通过在流场控制方程中添加“源项”来实现,而流场对结构的作用则通过结构周围流体质点速度的插值来实现,从而有效地避免了流体渗漏(如图 12 所示),经过与某型飞机的试验数据对比,优化后的算法较

好地避免了流体渗透,因此与试验结果更为接近。

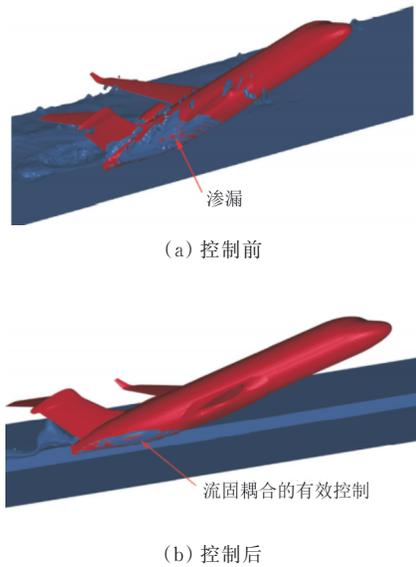


图 12 S-ALE 方法对渗漏的有效控制^[66]
Fig. 12 The effective prevention of fluid leakage by S-ALE method^[66]

2.4.3 FE-SPH

由于 ALE 的计算特性,在每个计算的时间步内网格都需要随着运动边界的变化做出相应的调整以保证计算精度与稳定性,因此动网格技术成为了研究热点之一。另外,虽然 ALE 结合了拉格朗日法与欧拉法的优点,但当流体发生大量的飞溅与喷溅时,由于流体单元的数量是恒定的,依然会导致网格尺寸的增加和变形。总之,基于网格的流体域模型对于大水平速度下的水上迫降情况,或是具有明显结构变形或破坏的情况,仍具有一定缺陷,在计算效率方面也远低于拉格朗日法^[67]。而有限元法与 SPH 相结合(FE-SPH)作为一种成熟的流固耦合算法在工程领域已经得到了一些应用^[68-70],因此,近年来研究者尝试将该方法用于研究飞机水上迫降问题。

2009年,N. R. S. Toso^[71]采用商业软件 PAM-CRASH 基于 FE-SPH 法对三维球体、直升机地板和 WG30 直升机垂直撞水问题进行了研究,如图 13 所示。研究表明直升机的蒙皮、门框和梁在冲击水载荷作用下的变形趋势是可以预测的,但数值计算得到的压力与试验相比总是偏保守的,认为是模型中忽略了空气影响导致的。还指出,要将该方法用于考虑带有水平速度的全尺寸结构飞

机水上迫降仿真,需要的计算时间将是巨大的,因此 FE-SPH 更适用于模拟复杂结构的纯垂直撞击水面问题。

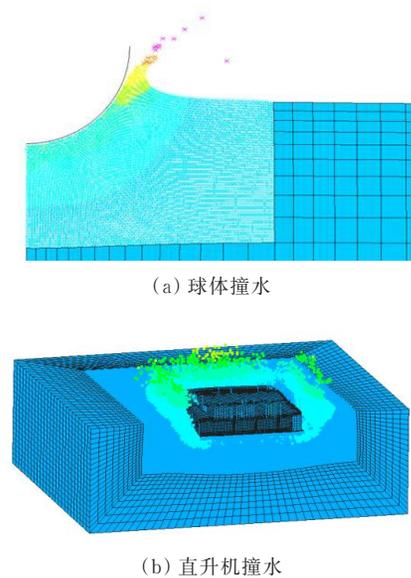


图 13 FE-SPH 法在直升机撞水问题中的应用^[71]
Fig. 13 Application of SPH method in the problem of helicopter impacting on water^[71]

2013年,卢鸣飞等^[72]基于 FE-SPH 耦合算法对某型客机水上迫降流固耦合问题进行了研究,分析了不同角度、速度等参数的影响,模型经过了多重简化,且没有对算法进行验证,仅证明了其可行性,对参数影响给出定性结论,无法在结构响应和载荷变化规律上开展详细分析。2017年,M. H. Siemann 等^[73]对由铝和复合材料组成的不同厚度、材料和曲率的面板进行了入水冲击试验,并分别使用 ALE 和 FE-SPH 进行了数值仿真,结果表明在对流体压力的变化规律和峰值模拟上 ALE 都更加精确。分析原因,一方面由于 FE-SPH 为了节省计算时间未建立空气模型,忽略了气垫和通风等效应,降低了水载荷,表现在时间上出现了延迟;另一方面,由于粒子的分辨率远大于试验中的压力传感器尺寸,因此无法捕捉到压力峰值。此外,随着计算时间的增加,SPH 的粒子分布越来越不规则,从而导致数值结果产生振荡。在对固体应变的模拟中,由于结构模型进行了简化,两种方法均存在时间和数值上的差异,数值模拟中施加压力的速度更快。2020年,吕锦锋等^[74]建立了一种大型运输机水上迫降的机身底部吸力模型,

与飞机直接接触的水体用SPH粒子模拟,外围水域则用拉格朗日体元模拟,通过定义接触进行力的传递;同时为了实现对机身吸力的模拟,提出了基于动量方程的吸力函数,得到的飞机姿态与试验的变化趋势基本一致。

3 对比分析

在这些方法中,面元法的关键在于划分面元的数量和尺寸,因此多用于简单外形的物体入水问题。然而真实的飞机迫降过程中,水面破碎飞溅产生旋度已不满足势流理论,因此该方法更适用于简单外形物体入水冲击过程的定性分析,但是描述民用飞机的水上迫降过程存在一定难度,可用于在飞机方案设计阶段对水上迫降性能定性评估。

基于VOF的FVM优势在于能够较为准确地模拟飞机在入水初期的气动力、水动力以及尾部吸力,准确捕捉入水初期的受力特点和运动趋势。虽然FVM对于破碎和飞溅等现象的模拟效果较差,但这些现象对于宏观运动趋势影响较小,在工程应用中可忽略。缺点在于该方法的精度十分依赖于网格质量,对物体运动的模拟依赖于动网格技术的发展,虽然采用整体运动网格确实可以避免动网格带来的问题,但当迫降中飞机姿态剧烈变化时,水面在网格加密区附近产生的波动较大,仍然会导致流动无法精确捕捉,因此通常在迫降中后期模拟精度出现下降。要提高模拟精度必须提高机体附近水气交界面的网格密度,由于机体处于动态运动过程中,所需加密的网格区域较大,势必带来计算资源的增加。FVM可用于初步设计阶段评估机身外形尤其是后机身底部形状对迫降性能的影响,为判断最佳迫降姿态提供依据,也可用于详细设计阶段对飞机所受水载荷进行保守评估。

SPH避免了由于网格划分产生的问题,适用于处理自由表面的翻卷、破碎、大变形等,可用于模拟流固耦合、液体飞溅等问题。由于粒子仅在彼此的光滑长度之内才能相互作用,因此需要反复重新确定哪些粒子有相互作用。在使用基本粒子运动方程时,粒子可能在它们的位置上重合,粒

子的混乱增加了空间离散误差,从而降低精度甚至导致模拟无法进行。对SPH的研究重点在于如何提高计算效率与精度。另外,SPH在流体与固体的边界处理上存在较大难度,对于以水平速度为主导的流体运动以及水气固耦合产生的吸力效应,SPH在模拟精度上存在劣势,需要补充建立相应的模型或函数,复杂度较高。该方法更适用于研究撞击过程中粒子的运动规律,在水上迫降问题的研究中优势不明显,可在初步设计阶段辅助其他方法使用。

FEM的优势在于引入了结构模型,对机体柔性的考虑是其他方法所不具备的,因此在工程实际中更具应用价值,适用于详细设计阶段对飞机水上迫降时的全机和局部结构响应进行评估。缺点在于对流体运动特点如空穴效应、吸力效应等的模拟准确度较低,仅使用FEM得到的结果与试验相比差异较大。因此可与其他方法耦合使用,例如FVM和FEM耦合,首先采用FVM模拟迫降过程,获取运动姿态和局部压力动态历程,再采用FEM考虑机体柔性后对计算结果进行修正,流程如图14所示。另外还可以将FEM和SPH耦合,在飞机附近的水域采用更适合处理自由表面的SPH而在其他区域采用计算成本较低的FEM,当冲击产生的水面变形较大时,可以较好地平衡计算精度和计算效率。

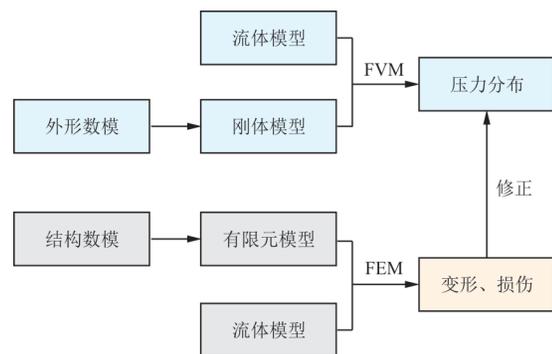


图14 FVM-FEM单向耦合流程

Fig. 14 Unidirectional coupling process FVM-FEM

综合以上4种不同数值仿真方法的优缺点和适用性,各种方法的优劣对比如表1所示,可以看出:尽管FVM具有一定优势,但不同方法的性能也取决于相应软件的开发阶段、详细参数设置以及具体的应用问题。

表1 不同仿真方法对比
Table 1 Comparison of different simulation methods

方法	优点	缺点	适用阶段
面元法	计算效率高	(1) 无法模拟空气和水 (2) 无法考虑结构弹性 (3) 计算精度低	方案设计阶段
FVM	(1) 可以相对准确地模拟空气和水的流动 (2) 应用和验证广泛,成熟度较高 (3) 计算精度较高	(1) 无法考虑结构弹性 (2) 计算效率较低 (3) 受网格和计算参数影响较大	(1) 初步设计阶段 (2) 详细设计阶段
SPH	不依赖网格,建模难度较低	(1) 无法考虑结构弹性 (2) 无法准确模拟流体 (3) 计算精度较低 (4) 计算效率依赖粒子分布	初步设计阶段
FEM	(1) 计算精度较高 (2) 可考虑结构弹性	(1) 无法准确模拟流体 (2) 耦合其他方法时建模复杂度较高 (3) 计算效率较高但耦合其他算法时有所降低	详细设计阶段

4 发展趋势

目前国内外在民用飞机水上迫降研究中大量应用了数值仿真方法,并开发了相应的工具软件,有力地提升了数值仿真方法在水上迫降流固耦合现象研究中的成熟度。至于在民用飞机设计的实际工程应用尤其是适航验证过程中,工程师重点关注的是飞机的运动姿态、受载情况以及结构响应,以期寻找最佳的迫降方案,指导飞行员的应急操作,同时为最优的结构设计提供支持。

(1) 对于模型运动姿态和受载形式的研究,关键在于较为准确地模拟出水和空气两种密度、黏性、力学特性差异较大流体的流动现象,尤其是对气动升力、后体吸力和气穴效应的精确捕捉。

(2) 入水冲击过程中,水和飞机结构之间存在密切的耦合作用,而新型民用飞机大量采用复合材料,在冲击水载荷下的结构响应更加复杂。着水过程中载荷呈动态变化,结构动态变形又会影晌局部载荷的作用,在局部受载严重区域甚至可能发生破损,而目前考虑破损后的迫降性能研究较少。

(3) 考虑到结构设计作为影响水上迫降的关键因素,有限元法与其他方法相结合将是未来民用飞机水上迫降适航验证的重点研究方向。而对

于结构响应的研究,关键在于如何处理结构和流体的边界,以及如何考虑结构非线性的影响。

(4) 近年来随着超算中心的不断发展,计算资源带来的限制减弱,流体和固体的双向耦合将会成为另一种趋势,为精确模拟气动力、水动力和机体柔性提供可能。另外值得一提的是,仿真方法的验证需要大量试验数据支撑,且需覆盖零件级、部段级乃至全机级的完整金字塔,在时间和成本上耗费极大。因此,在仿真方法研究的同时有必要开展试验研究的系统性规划和实施。

5 结束语

在国内民用航空高速发展的总体趋势下,水上迫降作为一种必须考虑的应急着陆场景,如何高效地获取准确的研究结论,对民用飞机设计和适航验证意义重大。但目前我国在水上迫降数值仿真方法的研究领域仍处于初步发展阶段,且大多依赖于国外商用软件。在方法验证方面,可积累的试验数据较少,尚未形成体系,而数值仿真方法最终应用于型号研制的前提必须是充分的验证。因此,当前不仅要着眼于利用计算机和信息技术发展数值仿真方法,还需构建完整的设计研究和验证路径,从而保障民用飞机研制的整体进程。

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 standards of transport category aircraft: CCAR-25-R4[S]. Beijing: Civil Aviation Administration of China, 2011. (in Chinese)
- [2] PATEL A A, GREENWOOD R P J. Transport water impact and ditching performance: FAA/AR-1995-54 [R]. Virginia: National Technical Information Service, 1996.
- [3] SIEMANN M, KOHLGRÜBER D, SCHWINN D, et al. Ditching simulation of large complex aircraft models[C]// 2017 ESI Forum. Deutschland: ESI, 2017: 1-8.
- [4] RICHARD E Z, JAMES C W, ALAN D L, et al. Aircraft crash survival design guide: volume III, aircraft structural crashworthiness: TR 89-D-22C[R]. Arizona: AVSCOM, 1989.
- [5] Von KARMAN T. The impact on seaplane floats during landing [R]. Washington: National Technical Information Service, 1929.
- [6] WAGNER H. Uber stoss-gleitvorgänge an der oberfläche

- von flussigkeiten[J]. ZAMM Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1932, 12(4): 193-215.
- [7] LOGVINOVICH G V. Hydrodynamics of free-boundary flows [M]. Washington: US Department of Commerce, 1972.
- [8] ZHAO R, FALTINSEN O M. Water entry of two-dimensional bodies[J]. Fluid Mech, 1993, 246(1): 593-612.
- [9] 钱勤, 黄玉盈, 乐东义. 时域边界元法分析撞水响应[J]. 固体力学学报, 1996, 17(1): 49-57.
QIAN Qin, HUANG Yuying, YUE Dongyi. Impact analysis of rigid body with water by time domain boundary element method[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 1996, 17(1): 49-57. (in Chinese)
- [10] KOROBKIN A A. Analytical models of water impact[J]. European Journal of Applied Mathematics, 2004, 15(6): 821-838.
- [11] 段文洋, 朱鑫, 倪阳, 等. 考虑流动分离的有限宽楔形剖面匀速入水受力分析[J]. 船舶力学, 2013, 17(8): 911-919.
DUAN Wenyang, ZHU Xin, NI Yang, et al. Constant velocity water entry of finite wedge section with flow separation [J]. Journal of Ship Mechanics, 2013, 17(8): 911-919. (in Chinese)
- [12] LLOYD J F, EDWARD L H. Model ditching investigation of the Douglas DC-4 and DC-6 airplanes: NACA-RM-SL9K02a[R]. Washington: NACA, 1949.
- [13] ELLIS E M, LLOYD J F. Experimental investigation of the effect of rear-fuselage shape on ditching behavior: NACA-TN-2929[R]. Washington: NACA, 1953.
- [14] WILLIAM C T. Model ditching investigation of the Boeing 707 jet transport: NACA-RM-SL55K08[R]. Washington: NACA, 1955.
- [15] LLOYD J F, EDWARD L H. Ditching investigation of dynamic models and effects of design parameters on ditching characteristics: NACA-TN-3946 [R]. Washington: NACA, 1957.
- [16] MARGARET F S. Accelerations and bottom pressures measured on a B-24D airplane in a ditching test: NACA-MR-L4K14[R]. Washington: NACA, 1944.
- [17] IAFRATI A, GRIZZI S, OLIVIERI F. Experimental investigation of fluid-structure interaction phenomena during aircraft ditching[C]// 2019 AIAA SciTech Forum. California: AIAA, 2019: 1-10.
- [18] 刘沛清, 屈秋林, 郭保东, 等. 数值计算技术在飞机水上迫降中的应用[J]. 力学与实践, 2014, 36(3): 278-284.
LIU Peiqing, QU Qiulin, GUO Baodong, et al. Application of computational fluid dynamics in the planned ditching of a transport airplane[J]. Mechanics in Engineering, 2014, 36(3): 278-284. (in Chinese)
- [19] 罗文莉. 民用飞机水上迫降数值仿真研究进展[J]. 科技视界, 2016(17): 2.
LUO Wenli. Research process of numerical simulation on civil aircraft ditching [J]. Science and Technology Vision, 2016(17): 2. (in Chinese)
- [20] ANGHILERI M, CASTELLETTI L M L, FRANCESCONI E, et al. Survey of numerical approaches to analyse the behavior of a composite skin panel during a water impact[J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 63: 43-51.
- [21] 童明波, 陈吉昌, 李乐, 等. 飞行器水载荷结构完整性数值模拟现状与展望——Part I: 水上迫降和水上漂浮[J]. 航空学报, 2021, 42(5): 118-152.
TONG Mingbo, CHEN Jichang, LI Le, et al. State of the art and perspectives of numerical simulation of aircraft structural integrity from hydrodynamics—Part I: ditching and floating[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2021, 42(5): 118-152. (in Chinese)
- [22] LEIGH B R. Using the momentum method to estimate aircraft ditching loads [J]. Canadian Aeronautics and Space Journal, 1988, 34(3): 162-169.
- [23] BENSCH L, SHIGUNOV V, SODING H. Computational method to simulate planned ditching of a transport airplane [J]. Computational Fluid and Solid Mechanics, 2003, 24: 1251-1254.
- [24] 钱勤, 黄玉盈, 李其申, 等. 粘性流下物体撞水分析的 Laplace 变换——边界元耦合方法[J]. 重庆建筑大学学报, 2000, 22(6): 45-49.
QIAN Qin, HUANG Yuying, LI Qishen, et al. Laplace transform-BE coupling method for viscous fluid-structure impact analysis[J]. Journal of Chongqing Jianzhu University, 2000, 22(6): 45-49. (in Chinese)
- [25] PARK M, JUNG Y, PARK W. Numerical study of impact force and ricochet behavior of high speed water-entry bodies [J]. Computers and Fluids, 2003, 32(7): 939-951.
- [26] FARHAD G. Analytical method for the ditching analysis of an airborne vehicle[J]. Journal of Aircraft, 1990, 27(4): 312-319.
- [27] VLADIMIR S, HEINRICH S. Numerical simulation of emergency landing of aircraft on a plane water surface[C]// 2nd International Conference on High-perform. Hamburg: HIPER, 2001: 1-4.
- [28] WICK A T. Computational simulation of an unmanned air vehicle impacting water[D]. Nevada: Iowa State University, 2006.
- [29] LINDENAU O, BENSCH L, SERCKWALL H. Aircraft ditching: a free surface/free motion problem[J]. Archives of Civil and Mechanical Engineering, 2007, 7(3): 177-190.
- [30] 贺谦, 陈效鹏, 李磊, 等. 飞机水面降落的机身载荷研究[J]. 强度和环, 2009, 36(4): 28-33.
HE Qian, CHEN Xiaopeng, LI Lei, et al. Research on the load of aircraft landed on water[J]. Structure and Environment Engineering, 2009, 36(4): 28-33 (in Chinese).
- [31] ZHANG T, LI S, DAI H C. The suction force effect analysis of large civil aircraft ditching[J]. Science China Technological Sciences, 2012, 55(10): 2789-2797.
- [32] 屈秋林, 刘沛清, 郭保东, 等. 某型客机水上迫降的着水冲击性能数值研究[J]. 民用飞机设计与研究, 2009(s1):

- 64-69.
 QU Qiulin, LIU Peiqing, GUO Baodong, et al. Numerical study on impact mechanical properties of an airliner landing on water [J]. *Civil Aircraft Design and Research*, 2009 (s1): 64-69. (in Chinese)
- [33] 郭保东, 屈秋林, 刘沛清, 等. 混合翼身布局客机 SAX-40 水上迫降力学性能数值研究 [J]. *航空学报*, 2013, 34 (11): 2443-2451.
 GUO Baodong, Qu Qiulin, LIU Peiqing, et al. Ditching performance of silent aircraft SAX-40 in hybrid wing-body configuration [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2013, 34(11): 2443-2451. (in Chinese)
- [34] GUO Baodong, LIU Peiqing, QU Qiulin, et al. Effect of pitch angle on the initial stage of a transport aircraft ditching [J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2013, 26(1): 17-26.
- [35] 王丑丑, 吴宗成. 飞机简化模型水上迫降入水的数值研究 [J]. *航空工程进展*, 2016, 7(1): 51-61.
 WANG Chouchou, WU Zongcheng. Water entry numerical study of a simplified aircraft model in ditching [J]. *Advances in Aeronautical Science and Engineering*, 2016, 7(1): 51-61. (in Chinese)
- [36] 吴宗成, 黄波恩, 吴亚聪. 滑移动网格在波浪水面迫降数值模拟中的应用 [J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2019, 51(1): 80-86.
 WU Zongcheng, HUANG Boen, WU Yacong. Application of sliding dynamic grid to wavy water ditching simulation [J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2019, 51 (1): 80-86. (in Chinese)
- [37] ZHENG K, ZHAO X, YANG Z, et al. Numerical simulation of water entry of a wedge using a modified ghost-cell immersed boundary method [J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2019, 25(2): 589-608.
- [38] QU Qiulin, HU Mingxuan, GUO Hao, et al. Study of ditching characteristics of a transport aircraft by global moving mesh [J]. *Journal of Aircraft*, 2015, 52(5): 1-9.
- [39] QU Q, LIU C, LIU P, et al. Numerical simulation of water-landing performance of a regional aircraft [J]. *Journal of Aircraft*, 2016, 53(6): 1-10.
- [40] 卢昱锦, 肖天航, 李正洲. 高速平板着水数值模拟 [J]. *航空学报*, 2017, 38(s1): 5-13.
 LU Yujin, XIAO Tianhang, LI Zhengzhou. Numerical simulation of high speed plate ditching [J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 2017, 38(s1): 5-13. (in Chinese)
- [41] ZHAO Y, QU Q, LIU P. Numerical study on the extreme impact load of wavy-water ditching [C] // IOP Conference Series Materials Science and Engineering. [S. l.]: IOP, 2020: 816.
- [42] LUCY L B. A numerical approach to the testing of the fission hypothesis [J]. *The Astrophysical Journal*, 1997, 8 (12): 1013-1024.
- [43] GINGOLD R A, MONAGHAN J J. Kernel estimates as a basis for general particle methods in hydrodynamics [J]. *Journal of Computational Physics*, 1982, 46(3): 429-453.
- [44] MONAGHAN J J. Simulating free surface flows with SPH [J]. *Journal of Computational Physics*, 1994, 110 (2) : 399-406.
- [45] LIU M B, LIU G R. Smoothed particle hydrodynamics (SPH): an overview and recent developments [J]. *Archives of Computational Methods in Engineering*, 2010, 17 (1) : 25-76.
- [46] ZHANG Z, WANG L, SILBERSCHMIDT V. Damage response of steel plate to underwater explosion: effect of shaped charge liner [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2017, 103: 30-49.
- [47] MING F, ZHANG A, XUE Y, et al. Damage characteristics of ship structures subjected to shockwaves of underwater contact explosions [J]. *Ocean Engineering*, 2016, 117: 359-382.
- [48] JANG J, AHN S. Bird-strike damage analysis and preliminary design of composite radome structure using smoothed particle hydrodynamics [J]. *Applied Composite Materials*, 2019, 26: 763-782.
- [49] CHANDRA C, WONG T Y, BAYANDOR J. Crashworthiness assessment in aircraft ditching incidents [C] // 27th International Congress of the Aeronautical Science. Nice: ICAS, 2010: 1-13.
- [50] MORELL M A, CLIMENT H. CN-235-300M ditching-task description and schedule: NT-3-AA0-02004 [R]. Madrid: EADS-CASA, 2002.
- [51] KELLER K, CLIMENT H, WERNSDORFER T. CN-235-300M deepwater-ditching tests evaluation report: NT-3-AA0-04004 [R]. Madrid: EADS-CASA, 2005.
- [52] RUEDA F, BENITEZ L, CLIMENT H. CN-235-300M deepwater-structure response to ditching loads: DT-3-AA0-05003 [R]. Madrid: EADS-CASA, 2005.
- [53] CLIMENT H, BENITEZ L, ROSICH F, et al. Aircraft ditching numerical simulation [C] // Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences. Hamburg: ICAS, 2006: 1-5.
- [54] GROENENBOOM P, CAMPBELL J, BENTEZ L, et al. Innovative SPH methods for aircraft ditching [C] // 11th World Congress on Computational Mechanics. Barcelona: [s. n.], 2014: 1-12.
- [55] XIAO T, QIN N, LU Z, et al. Development of a smoothed particle hydrodynamics method and its application to aircraft ditching simulations [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 66: 28-43.
- [56] CHENG H, MING F, SUN P, et al. Towards the modeling of the ditching of a ground-effect wing ship within the framework of the SPH method [J]. *Applied Ocean Research*, 2019, 82: 370-384.
- [57] 张盛, 闫家益, 朱书华, 等. 基于 SPH 的小型飞机水上迫降姿态数值仿真 [J]. *航空计算技术*, 2014, 44(4): 76-79.
 ZHANG Sheng, YAN Jiayi, ZHU Shuhua, et al. Numerical simulation of light aircraft ditching attitude based on SPH method [J]. *Aeronautical Computing Technique*, 2014, 44

- (4): 76-79. (in Chinese)
- [58] BROOKS J R, ANDERSON L A. Dynamics of a space module impacting water[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1994, 31(3): 509-515.
- [59] WITTLIN G, SMITH M, RICHARDS M. Airframe water impact analysis using a combined MSC/DYTRAN-DRI/KRASH approach [C] // 53rd Annual Forum Virginia. [S. l.]: American Helicopter Society, 1997: 1138.
- [60] PALACIOS R, BENITEZ L, CLIMENT H. Flexibility effects in CN235-300M ditching analysis; NT-3-AA0-05002 [R]. Madrid: EADS-CASA, 2005.
- [61] SHOJI H, MINEGISHI M, MIYAKI H, et al. Hydrodynamic impact estimation of transport fuselage structure with vertical drop water impact tests [C] // 49th AIAA Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Illinois: AIAA, 2008: 1746.
- [62] 贺谦, 李元生, 李磊, 等. 基于ALE方法的飞机水面降落过程[J]. *爆炸与冲击*, 2010, 30(2): 125-130.
HE Qian, LI Yuansheng, LI Lei, et al. On dynamic structural response of an airplane landing into water[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2010, 30(2): 125-130. (in Chinese)
- [63] 黄勇. 民用飞机水上迫降数值模拟计算研究[C]// 第十届全国振动理论及应用学术会议. 南京: 中国振动工程学会, 2011: 1130-1137.
HUANG Yong. Civil transport ditching simulation study [C]// The 10th National Conference on Theory and Application of Vibration. Nanjing: NVTA, 2011: 1130-1137. (in Chinese)
- [64] 徐文岷, 李凯, 黄勇. 民用飞机水上迫降数值模拟分析[J]. *计算机辅助工程*, 2013, 22(6): 51-54.
XU Wenmin, LI Kai, HUANG Yong. Numerical simulation and analysis on civil aircraft ditching[J]. *Computer Aided Engineering*, 2013, 22(6): 51-54. (in Chinese)
- [65] HU W, WANG Y, CHEN C. Numerical simulation of aircraft ditching based on ALE method[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014, 668/669: 490-493.
- [66] 王明振, 曹东风, 吴彬, 等. 基于S-ALE流固耦合方法的飞机水上迫降动力学数值分析[J]. *重庆大学学报*, 2020, 43(6): 21-29.
WANG Mingzhen, CAO Dongfeng, WU Bin, et al. Numerical analysis of aircraft dynamic behavior in ditching based on S-ALE fluid-structure interaction method [J]. *Journal of Chongqing University*, 2020, 43(6): 21-29. (in Chinese)
- [67] RIBET H, LABORDE P, MAHE M. Numerical modeling of the impact on water of a flexible structure by explicit finite element method-comparisons with Radioss numerical results and experiments[J]. *Aerospace Science and Technology*, 1999, 2: 83-91.
- [68] ATTAWAY S W, HEINSTEIN M W, SWEGLE J W. Coupling of smooth particle hydrodynamics with the finite element method [J]. *Engineering and Design*, 1994, 150: 199-205.
- [69] GRIMALDI A, BENSON D J, MARULO F, et al. Steel structure impacting onto water coupled finite element smoothed particle hydrodynamics numerical modeling [J]. *Journal of Aircraft*, 2011, 48(4): 1299-1308.
- [70] HU D, LONG T, XIAO Y, et al. Fluid-structure interaction analysis by coupled FE-SPH model based on a novel searching algorithm [J]. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 2014, 276: 266-286.
- [71] TOSO N R S. Contribution to the modelling and simulation of aircraft structures impacting on water [D]. Baden-Wuerttemberg: University of Stuttgart, 2009.
- [72] 卢鸣飞, 华诚. 基于FEM-SPH耦合算法的飞机水上迫降的力学建模与分析[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2013, 52(5): 583-591.
LU Mingfei, HUA Cheng. Model and numerical simulations of water ditching by FEM-SPH coupling method [J]. *Journal of Fudan University (Natural Science)*, 2013, 52(5): 583-591. (in Chinese)
- [73] SIEMANN M H, LANGRAND B. Coupled fluid-structure computational methods for aircraft ditching simulations comparison of ALE-FE and SPH-FE approaches [J]. *Computers and Structures*, 2017, 188: 95-108.
- [74] 吕锦锋, 梁元, 谭申刚. 大型运输机水上迫降动力学分析及模型验证[J]. *装备环境工程*, 2020, 17(9): 154-159.
LYU Jinfeng, LIANG Yuan, TAN Shengang. Ditching simulation and model test technology of large transport aircraft [J]. *Equipment Environmental Engineering*, 2020, 17(9): 154-159. (in Chinese)

作者简介:

罗文莉(1991—),女,硕士,高级工程师。主要研究方向:飞行器载荷设计。

陈书涌(1998—),男,硕士研究生。主要研究方向:飞行器设计及飞行器水上迫降载荷。

陈保兴(1963—),男,博士,研究员。主要研究方向:飞机结构强度。

(编辑:丛艳娟)