

文章编号: 1001-1455(2008)03-0276-07

入水冲击问题研究的现状与进展*

王永虎, 石秀华

(西北工业大学航海学院, 陕西 西安 710072)

摘要: 无论在理论分析还是数值模拟方面, 入水冲击和砰击都是比较复杂的瞬态物理问题。按照时间历程分三个阶段综述了入水冲击理论、试验和数值仿真的发展概况, 阐述了入水冲击和砰击现象现阶段研究的内容和热点, 特别针对数值建模技术发展的研究状况进行重点叙述。为航天和航海领域进一步开展入水研究提供参考。

关键词: 流体力学; 研究现状; 综述; 入水; 冲击; 砰击; 冲击载荷

中图分类号: O353.4

国标学科代码: 130·25

文献标志码: A

1 引言

水上飞机和宇宙飞船的水上着落、空投鱼雷的入水冲击、船舶在风浪中的砰击和海上救生艇的抛落等过程中, 会激起周围流体介质的运动; 反过来, 流体介质对结构又施加各种反作用力, 特别是在入水冲击初期瞬态间(毫秒级)过程中会遭受巨大的冲击载荷, 这就涉及到结构入水冲击动力学问题。入水问题的研究对入水结构强度的设计起着重要作用; 如空投或火箭助飞的水中兵器从空气介质侵入到流体介质的过程中, 面临着冲击后结构损坏、器件失灵、忽扑和弹道失控等问题, 高速船舶在航行过程中会受到很大的流体砰击载荷作用, 可能导致局部结构失效。因此, 入水冲击技术研究具有重要的工程应用背景, 随着现代军事和民用航空航海领域的发展, 得到了越来越多的关注。

关于入水冲击问题的研究, 无论是在理论研究、试验研究还是数值计算方法研究上都具有一定难度。在 von Karman 和 Wagner 的理论基础上, 对理论方法和数值分析已经进行了大量的研究工作, 并取得了一定的成就。本文中, 叙述国外和国内发展状况和发展趋势, 以供此领域的研究者参考。

2 初期入水冲击问题的研究

入水过程是一个十分复杂的物理现象, 理论分析相当困难。早期入水问题主要是针对入水试验研究, 1900 年, A. M. Worthington^[1] 利用当时出现的闪光摄影技术, 观察小球落入不同液体时候出现的飞溅和空泡现象, 成为入水现象原理试验的第一人。图 1 是现在采用高速摄像技术获取的刚性球入水过程图像, 可以清楚地看出入水过程中伴随着飞溅和空泡的产生。1919 年, G. H. Bottomley^[2] 利用水上飞机的 V 型浮舟模型进行跌落试验, 并且根据测得的减速度曲线, 分析了水上着陆时水上飞机受到的最大冲击力。1930 年, Watanabe^[3] 最早采用圆锥体进行入水冲击实验研究, 测量出冲击载荷和时间的关系。

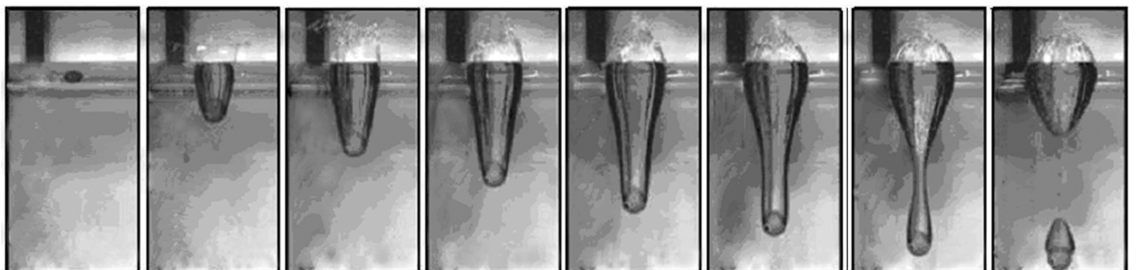


图 1 采用高速摄像技术记录圆球的入水过程

Fig. 1 Sphere water-entry images by high-speed camera technology

* 收稿日期: 2006-12-31; 修回日期: 2007-09-20

作者简介: 王永虎(1974—), 男, 博士研究生。

而真正涉足入水理论技术研究的,是 T. von Karman^[4],1929 年,他最早采用附加质量代替流体作用来分析入水冲击问题,提出附加质量法计算入水冲击载荷,将水上飞机降落过程中的浮舟理想化为二维楔形体入水过程,采用动量守恒定律推导了入水冲击载荷的计算公式。为了采用动量守恒定律,T. von Karman 假设入水初期流体结构系统能量守恒,提出附加质量的概念,认为侵水过程中,入水体减速丧失的动量转化成所形成的流场的动量的增加量。质量为 M 的入水结构体以初速度 v_0 垂直撞击水面,附连水质量为 m ,则根据动量守恒定律,可以得到: $Mv_0 = Mv + mv$ 。对时间微分,就可得到近似瞬态入水冲击力公式。1932 年,V. H. Wagner^[5]将 T. von Karman 的方法理论化,又考虑到冲击时水面的抬升现象,提出了小斜升角模型的近似平板理论,成为现今理论研究的基础。并且引入了水波影响因子,运用伯努利方程,导出冲击压力在结构沾湿面上的分布状况,使理论分析更符合实际问题。在此间,V. H. Wagner 提出的平板理论在求解入水过程中结构受力状况和流体动能得到广泛应用,同时他提出自相似解法,为以后其他相似解奠定了基础。

3 中期入水冲击问题的研究

国外全面开展入水问题的研究是在二战以后到 20 世纪 80 年代。二战后,各国充分认识到入水冲击问题的研究在军事领域中的重要性,于是纷纷投身于入水问题的研究中。并且不仅局限于完善入水冲击载荷计算,还将研究对象拓展到入水过程的各个方面,并考虑了外因对入水冲击的影响。W. L. Mayo^[6]在 Wagner 理论上,考虑了波浪对附加质量的影响、沾湿面上的压力分布以及引起最大冲击载荷的影响,针对 1929~1938 年出现的大量理论分析水上飞机着陆问题,根据实际情况对理论结果作了相应的修正。而 B. Milwitzky^[7]考虑到水上飞机到冲击滑行过程中的俯仰力矩、滑行角与 V 型浮舟的斜升角等因素,采用无量纲分析方法简化了数学模型。

在 50 年代,针对入水问题的研究国外出现了第一个高潮,这个时候的特征是开始考虑到流体的压缩效应。I. T. Egorov^[8]假设入水结构物中声速为无限大,流体是理想可压缩势流,按照平板入水冲击问题来对待,在出现空泡以前将产生最大冲击载荷。V. A. Eroshin 等^[9]对压缩效应进行了大量的实验和理论研究,得出采用不可压缩流体计算的冲击力比实际大的原因,这是由于实际入水冲击引起了流体可压缩效应所致。

1958 年,美国的水星计划首次进行载人航天飞行项目,为了解决返回地球的设备在海上回收问题,决定最大入水冲击载荷成了航天器设计的基本要求^[10]。航天器的特殊载入装备的入水理论逐渐得到重视,阿波罗登月计划中对太空舱的着陆撞击系统进行详细分析。D. N. Herting 等^[11]对太空舱的陆地和水面撞击进行试验分析,H. E. Benson^[12]采用阿波罗指令舱的刚性或带有弹性绝热片的缩比模型和全尺寸模型的试验数据,与入水着陆的理论结果进行比较。

空中弹道和入水弹道也是当时研究的热点。F. S. Burt^[13]提到的英国海军部水下弹道研究中心,采用了一个配备汽缸弹射器的尺寸为 381 cm×76.2 cm×101.6 cm 的水池进行入水冲击和水下弹道试验。J. G. Waugh^[14]出版了《水中弹道学模拟》,系统介绍了入水弹道试验模拟技术和知识。A. May^[15]在火箭助飞导弹以零攻角方向垂直入水和斜入水研究中,分析了空投鱼雷冲击力系、入水空泡的形成、成长和溃灭的过程,以及冲击力系和流场等问题。由于在入水过程的各个阶段中,作用在雷体上的力是非线性的,提出了采用步进法把弹道运动划分成许多时间间隔,由时间间隔初始的参数值导出间隔终了时的参数值。G. Stoffmacher^[16]认为入水冲击载荷对随后的侵水过程中的弹道影响很小,但入水初期各项数据可以为水下弹道提供初始参数。

4 近期入水冲击问题的研究

近期入水冲击问题的研究主要从 20 世纪 90 年代开始,国内外对入水问题的研究又出现一个高潮,主要是对入水过程中涉及到的冲击载荷、水弹性、飞溅射流的试验和数值模拟进行深入的分析 and 研究。随着数值分析方法不断完善,利用有限元对流体域和固体域单独建立数值模型成为可能,将流体模型和结构模型耦合为一个水弹性模型,可以解决复杂三维几何结构入水问题,也可以处理流体可压缩性、非线性自由液面边界条件以及结构变形等问题。下面将对入水问题研究状况分成国内和国外两个方面分别进行阐述。

在国内,张效慈^[17]将入水问题分为撞水和砰击两种现象,他们既有共性也有异性。结构和流体之间的相互作用是入水问题的共性;而他们的异性则是,撞水是单次性的现象,入水速度高达几十米每秒甚至百米每秒,而砰击是结构和流体周期性的作用现象,即便高速双体船的入水速度也不是很高。撞水多出现在空投鱼雷、火箭助飞鱼雷等水中兵器,水上飞机海面着陆和返回舱海面回收等入水过程中,而砰击多出现在舰船在风浪中航行中艏艉交替与水面碰撞过程中。

但不管是撞水现象还是砰击现象,在分析中都要对非线性自由液面、冲击引起的液面隆起和飞溅进行简化处理,并且研究对象大多是简单的二元模型,在分析入水冲击问题中一般基于势流理论,流体运动的速度势满足 Laplace 方程

$$\Delta\Phi = 0$$

陈学农等^[18]利用时间步进法和边界元方法,分析平头物体在垂直和斜入水情况下的入水动力学过程,将隐式时间

差分法运用到数值计算上。顾懋祥等^[19]严格采用满足流体力学和弹性力学的数值计算方法,在时间域中用步进法,壳体固体域采用锥壳单元有限元方法,用差分方法求解流体域控制方程,得出入水冲击力和流场变化。李森虎等^[20]采用质点网格法针对二维平头结构物入水撞水进行模拟,并考虑到气垫效应以及入水空泡现象。郑际嘉等^[21]进行了刚性圆板自由落体入水的数值分析。钱勤等^[22]提出了一种混合数值方法求解撞水问题,任意的拉格朗日欧拉边界元的有限元混合方法,充分证明边界元方法在进行入水问题的数值分析中的优越性。后来钱勤等^[23]又提出 BE-Laplace 逆变换混合方法,在时间域内求得每个时间步增量的撞水力和液面波动。王冰等^[24]等利用边界元方法耦合非线性自由液面步进法求解入水问题,给出圆柱的撞水现象和楔形刚性体砰击现象的算例。

船舶流体砰击载荷有多种理论计算模型和数值计算方法,由于受到撞水物体几何外形、边界条件和撞水冲击速度等条件的限制,理论计算方法的应用范围有限。而弹性结构入水冲击过程中水弹性效应成为近期入水问题研究的重点,弹性结构与流体的耦合动力响应就是在水弹性效应的计算得到的。在进行水弹性数值分析研究中,卢炽华等^[25]在砰击问题计算中提出一种新的数值计算方法,流体域采用常规边界元方法,固体域采用有限元方法,利用自由液面产生的最大射流厚度作为数值计算阈值,通过离散伯努利方程,将流体边界元方程与结构的有限元方程耦合成水弹性方程,通过对水弹性耦合方程进行数值解耦处理可以详细分析入水问题。陈铁云等^[26]采用混合欧拉-拉格朗日方法对高速船舶砰击现象的冲击载荷进行数值计算。卢炽华等^[27]运用非线性边界元方法分析外飘和 U 型船体的二维楔形体常速入水砰击问题。刘理等^[28]采用有限元对船底结构在砰击过程中的动态响应进行研究,并考虑到非线性边界条件的处理。朱克强^[29-30]分析了船舶砰击过程中产生的水弹性,而且分析了水弹性考虑的范围。现在研究典型高速舰船的入水砰击问题,必定要考虑水弹性问题。

中国船舶科学研究中心和航天工业总公司 501 部共同对返回舱入水冲击进行试验,为设计返回舱提供海上性能指标^[31]。随着现代计算技术的发展与应用,使复杂入水流场预报成为可能,如采用粒子图像测速仪技术对入水初期的流场进行测量^[32],张军等^[33]利用流体体积法对二维楔形体入水初期流场进行了数值计算,采用粒子图像测速仪技术和高速摄影技术进行试验测试,随后做了比较。顾王明等^[34]考虑到对大细长比的圆柱壳入水流固冲击过程中出现的屈曲现象,分析屈曲对冲击载荷的影响,给出流固冲击屈曲的特性。

卢炽华等^[35]利用不同侵深的附加质量,对刚性细长体斜姿态落水冲击进行建模。如果入水角很小,会促使细长体空投鱼雷入水处在最危险的状态,卢炽华等^[36]分析这种状态下的结构的动态响应。江松青等^[37]对空投鱼雷的入水冲击问题进行冲击载荷作用下的动态响应分析。孙辉等^[38]通过二维楔形体入水冲击的试验分析,重点研究初始条件对冲击产生的结构动态响应的影响。

在国外,近来入水问题的研究理论上基本遵循 Wagner 渐近匹配近似理论,如 R. Coite^[39]对二维入水冲击普遍问题,建立简单的物理和数学模型,通过匹配渐近展开方法求解斜入水和波动自由液面的情况,从而拓展了 von Karman 和 Wagner 理论。T. Miloh^[40]也利用匹配渐近方法和增量法计算刚性球斜方向撞击不可压缩流体产生的冲击载荷。L. E. Fraenkel 等^[41]对楔形体以固定速度垂直撞水产生的流场变化进行理论分析。R. Zhao 等^[42]针对二维楔形体等速垂直入水砰击,在满足动量守恒和能量守恒的基础上,重点考虑了冲击引起的射流对数值计算的奇异性影响,确保高曲率射流的流体质量守恒,通过对沾湿面上的压力积分计算冲击载荷。M. Greenhow 等^[43]讨论了正浮力圆柱体入水撞击液层引起的射流和散射波,以及能量在出入水过程中的传递。A. A. Korobkin 等^[44]考虑结构物入水冲击的弹性问题,处理成两个问题的结合:一是先不考虑结构的弹性,求解流场对结构物的冲击载荷;二是在已知物面压力分布情况下计算结构物的弹性变形。这也是一种典型的简化入水问题的理论方法。G. X. Wu^[45]通过分析 T. Miloh 的增量法^[40]和 R. Zhao 等、O. M. Faltinsen 等的沾湿面压力积分法^[42,46],给出了两种方法是一致的结论。L. Xu 等^[47]研究了舰船砰击作用产生的冲击响应,利用二维对称冲击理论预测冲击力和力矩。Y. M. Scolan 等^[48]提出比切片理论更先进的逆 Wagner 理论分析三维钝体入水冲击,利用能量分布方法得到正确的压力分布和沿物面的动压力预测。

在入水问题研究中,无论从理论研究到数值分析,还是从经验公式到匹配渐近展开方法,常常假设水面在碰撞接触时候是水平自由液面,而忽视流固交界面之间的气垫效应。R. Coite 等^[49]和 S. D. Howison 等^[50]对小斜升角楔形体入水试验中存在压力振动现象进行分析,认为忽略气垫效应不会对计算结果产生很大差异。S. K. Wilson 等^[51]对入水冲击初始阶段交界面出现的气垫层进行建模,通过无量纲方法利用渐近理论得到解析解。E. -M. Yettou 等^[52]通过对五种楔形体模型以自由落体方式入水冲击进行试验,得出影响压力系数的重要因素,分析了各因素对冲击载荷变化的影响。

入水动力学问题必须考虑入水结构受到冲击载荷作用下的失稳和屈曲,并预测产生屈曲的临界冲击载荷峰值。S. J. Cui 等^[53]、H. Hao 等^[54]和 H. K. Cheong 等^[55]通过试验分析细长体在周期性入水冲击载荷作用下的动态屈服,着重分析不同加载方式和长细比对屈服行为的影响,给出了入水冲击屈曲准则。A. A. Korobkin 等^[56]在利用增量法分析冲击初始时刻出现的冲击压缩波的时候,将压力脉冲理论引进到入水冲击问题中。A. Carcaterra 等^[57-58]将入水冲击响应谱

方法引进到分析楔形体入水冲击的结构响应中,通过冲击信号特性进行冲击谱分析,避免了直接求解入水冲击问题,并且根据无量纲方法可以提前预计系统的冲击动态响应。S. Okada 等^[59]重点分析小角度入水冲击问题,对 Wagner 形式、存在气垫效应形式和介于两者之间的形式的入水冲击进行试验,通过采用平均冲击压力分析结构响应。由于压力小波谱可以为冲击现象提供大量的时域信息,E. V. Ermanyuka 等^[60]利用小波变换的方法分析压力时间历程,分析过程中产生的压力变化,表明气垫效应强烈影响冲击时间和射流形状,这给水问题研究增添了一种新的处理方法。由于入水问题是一个瞬态过程,W. Peng 等^[61]利用脉冲压力方法研究刚性圆盘跌落到平的水面上的问题。

在数值计算方面,所有的数值计算都在简化的无限求解域上进行。M. Anghileri 等^[62]利用有限元分析刚性球垂直入水。O. Faltinsen 等^[63]采用数值方法建立了两种数值模型,通过入水跌落试验来验证理论结果和数值结果。A. A. Korobkin 等^[64]将边界元和有限元差分法应用到悬浮体受到冲击引起的液流的非定常问题的分析上。B. Donguy 等^[65]用一种数值分析方法对二维和三维、刚性体和弹性体入水以及耦合非耦合情况进行详细分析,这是一种变化的有限元公式,在迭代过程中求得沾湿修正因子,通过流固耦合矩阵来处理固体和流体之间的相互作用,认为 R. Cionte^[69]和 S. D. Howson 等^[50]计算的二维楔形体入水产生的最大冲击水动力压力比实际的高。M. Park 等^[66]提出了基于无粘势流理论的切片数值方法,分析计算高速入水的冲击载荷和入水过程可能产生的忽扑行为。

D. Battistin 等^[67]讨论二维对称体垂直入水过程中,作用在冲击结构物上的水动力载荷。引用速度势理论和非线性边界积分,在沾湿面上应用 Neumann 条件,在自由液面上用 Dirichlet 条件,采用运动学和动力学条件,通过对非定常的伯努利方程进行积分得到自由液面上的速度势,解决了冲击产生的射流导致局部奇异性问题。G. X. Wu 等^[68]在势流理论基础上采用边界元和浅水域入水射流近似方法分析入水水动力问题,在射流区域建立了可以提供自由面形状和沾湿面压力分布的模型,简化射流厚度对速度场的极大影响,采用了自相似理论控制边界值问题。M. S. Seifl 等^[69]对入水冲击问题涉及的气体、液体和固体三相域进行分析,在对称和非对称入水冲击现象下利用流体体积法计算自由液面的位置变化。K. Takagi^[70]将椭物体视为二维入水体,采用位势方法精确计算附加质量、入水速度和侵深,计算结果更符合三维砰击入水的实际过程。G. Oger 等^[71]采用基于光滑质子水动力学的无网格方法处理入水冲击问题中涉及到的流体可压缩性,在耦合程序中利用 Runge-Kutta 和 SPH 法不断更新速度和位移信息,计算作用在刚性体上的水动力压力。

5 结束语

长期以来,国内外学者对入水问题的理论进行了深入的研究,开始将附加质量引用到计算冲击载荷到利用渐近理论计算沾湿面上的压力分布,现在运用增量法和逆 Wagner 理论方法,及各种数值分析方法。但是撞水和砰击问题涉及十分复杂的瞬态物理现象,当结构与流体发生作用时,不但流体会对结构产生强大的冲击载荷,而且结构的整体运动以及结构的变形和变形速度也会对流场产生显著的影响。因此,撞水和砰击问题仍是物体或载体入水过程中研究的重要问题,特别是高速入水的冲击与缓冲技术。目前,研究和应用的主要方向是在流体域采用有限差分法或边界元法等方法,而在固体域应用有限元方法进行建模,尤其是可以拓展分析固体域或弹性变形造成的耦合效应,即入水问题的水弹性效应。由于涉及到水弹性的数值计算的工作量很大,目前分析计算一般采用二维分析计算模型,所以迫切需要一种新型优化数值计算方法,才能满足更复杂入水问题三维分析的要求。

参考文献:

- [1] Worthington A M. Impact with a liquid surface studied with aid of instantaneous photography[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 1900,194A:175-199.
- [2] Bottomley G H. The impact of a model seaplane float on water[R]. Reports and Memoranda, No 583, 1919.
- [3] Watanabe. Resistance of impact on water surface[J]. Inst Phys Chem Res, 1930(12):251-267.
- [4] von Karman T. The impact of seaplane floats during landing[R]. Washington DC, USA: National Advisory Committee for Aeronautics, NACA Technical Notes 321, 1929.
- [5] Wagner V H. Phenomena associated with impacts and sliding on liquid surfaces[J]. Z Angew Math Mech, 1932,12(4):193-215.
- [6] Mayo W L. Hydrodynamic impact of a system with a single elastic mode[R]. NACA 1074-1075,1947.
- [7] Milwitzky B. Generalization theory for seaplane impact[R]. NACA 1103,1948.
- [8] Egorov I T. Impact on a compressible fluid[R]. Washington: NACA 1413,1956.
- [9] Eroshin V A, Romanenkov N I, Serebryakov I V, et al. Hydrodynamic forces produced when blunt bodies strike the surface of a compressible fluid[J]. Mekhanika Zhidkostii Gaza, 1979,6:44-51.
- [10] <http://www-pao.ksc.nasa.gov/kscpao/history/mercury/mercury.htm>, 2005-05-19.
- [11] Herting D N, Pohlen J C, Pollock R A. Analysis and design of the Apollo landing impact system[C]// Proceedings of the AIAA

- and NASA Third Manned Space Flight Meeting. Houston, USA, 1964.
- [12] Benson H E. Water impact of the Apollo spacecraft[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1966,3(8):1282-1284.
- [13] Burt F S. Hydrodynamic research[J]. *British Journal of Applied Physics*, 1961,12:323-328.
- [14] Waugh J G. Hydroballistics modeling[R]. AD A007529, 1975.
- [15] May A. Review of water-entry theory and data[J]. *AIAA Journal*, 1970,70:1-5.
- [16] Stoffmacher G. Hydrodynamic impact of conical-nosed vehicles during vertical water entry[J]. *Journal of Spacecraft and Rockets*, 1964,1(2):222-223.
- [17] 张效慈. 九〇年以来砰击与撞水研究的进展[J]. *中外船舶科技*, 1995(4):7-11.
ZHANG Xiao-ci. Study and development of slamming and impacting water from 1990[J]. *Domestic and Oversea Shipping Technology*, 1995(4):7-11.
- [18] 陈学农,何友声. 平头物体三维带空泡入水的数值模拟[J]. *力学学报*, 1990,22(2):129-137.
CHEN Xue-nong, HE You-sheng. Numerical simulation of 3D water entry of a blunt cylinder with a ventilated cavity[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 1990,22(2):129-137.
- [19] 顾懋祥,程贯一,张效慈. 平头旋转壳撞水水弹性效应的研究[J]. *水动力学研究与发展*, 1991,6(1):42-51.
GU Mao-xiang, CHENG Guan-yi, ZHANG Xiao-ci. The study of hydroelastic effect on the water-entry of a revolutionary shell with flat nose[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 1991,6(1):42-51.
- [20] 李森虎,何友声,鲁传敬. 超声速平头物体垂直撞水的数值模拟[J]. *水动力学研究与发展*, 1992,7(1):72-78.
LI Shen-hu, HE You-sheng, LU Chan-jing. A numerical simulation of the vertical impact of a supersonic flat-head body on a water surface[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 1992,7(1):72-78.
- [21] 郑际嘉,岳亚丁. 刚性圆板自由落体在水面上的冲击压力[J]. *水动力学研究与发展*, 1992,7(2):219-226.
ZHENG Ji-jia, YUE Ya-ding. Impact pressure of a disk falling upon water surface[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 1992,7(2):219-226.
- [22] 钱勤,黄玉盈,王石刚,等. 任意的拉格朗日欧拉边界元—有限元混合法分析物体撞水响应[J]. *固体力学学报*, 1994,15(1):12-18.
QIAN Qin, HUANG Yu-ying, WANG Shi-gang, et al. Fluid-structure impact analysis with a mixed method of arbitrary Lagrangian-Eulerian BE and FE[J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 1994,15(1):12-18.
- [23] 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 Yu-ying, YUE Dong-yi. Impact analysis of rigid body with water by time domain boundary element method [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 1996,17(1):49-57.
- [24] 王冰,叶天麒. 边界元的耦合界面步进法分析物体撞水响应[J]. *航空学报*, 1997,18(5):551-554.
WANG Bing, YE Tian-qi. Progressive displacement boundary element method for slamming analysis of rigid body[J]. *Acta Aeronautica et Astronautica Sinica*, 1997,18(5):551-554.
- [25] 卢焯华,何友声. 二维弹性结构入水冲击过程中的流固耦合效应[J]. *力学学报*, 2000,32(2):129-140.
LU Chi-hua, HE You-sheng. Coupled analysis of nonlinear interaction between fluid and structure during impact[J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2000,32(2):129-140.
- [26] 陈铁云,王刚. 高速船舶结构设计中流体冲击载荷的数值计算[J]. *上海交通大学学报*, 1998,32(11):30-33.
CHEN Tie-yun, WANG Gang. Numerical calculation of hydrodynamic impulsive loading in structural design of high speed ship [J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University*, 1998,32(11):30-33.
- [27] 卢焯华,何友声,王刚. 船体砰击问题的非线性边界元分析[J]. *水动力学研究与发展*, 1999,14(2):169-175.
LU Chi-hua, HE You-sheng, WANG Gang. Hull slamming analysis by using nonlinear boundary element method[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 1999,14(2):169-175.
- [28] 刘理,刘土光,李天匀,等. 大型船舶机舱结构冲击响应的数值模拟[J]. *船舶工程*, 1999(2):8-10.
LIU Li, LIU Tu-guang, LI Tian-yun, et al. Numerical simulation of impact response for machinery compartment of large-sized ship[J]. *Ship Engineering*, 1999(2):8-10.
- [29] 朱克强. 船体结构的线性水弹性分析[J]. *华东船舶工业学院学报*, 2000,14(4):13-19.
ZHU Ke-qiang. A linear hydroelastic analysis of ship hull structure[J]. *Journal of East China Shipbuilding Institute*, 2000,14(4):13-19.
- [30] 朱克强,郑道昌,周江华,等. 典型高速船的非线性水弹性响应[J]. *宁波大学学报(理工版)*, 2005,18(4):458-462.
ZHU Ke-qiang, ZHENG Dao-chang, ZHOU Jiang-hua, et al. Nonlinear hydroelasticity response of representative high speed ship [J]. *Journal of Ningbo University (Natural Science & Engineering Edition)*, 2005,18(4):458-462.
- [31] 宣建明,缪弋,程军,等. 返回舱水上冲击特性的试验研究与理论计算[J]. *水动力学研究与发展*, 2000,15(3):276-286.
XUAN Jian-ming, MIAO Yi, CHENG Jun, et al. Tests and calculations of water impact characteristics of a recovery module[J].

- Journal of Hydrodynamics, 2000,15(3):276-286.
- [32] 张志荣,洪方文,张军,等. 入水初期流场的测量方法[J]. 水动力学研究与发展,2001,16(3):274-278.
ZHANG Zhi-rong, HONG Fang-wen, ZHANG Jun, et al. The method of measuring initial flow field induced by water entry[J]. Journal of Hydrodynamics, 2001,16(3):274-278.
- [33] 张军,张志荣,洪方文,等. 楔形体入水初期流场的数值模拟[J]. 船舶力学,2003,7(4):28-35.
ZHANG Jun, ZHANG Zhi-rong, HONG Fang-wen, et al. Numerical simulation of initial flow of wedge entry[J]. Journal of Ship Mechanics, 2003,7(4):28-35.
- [34] 顾文明,唐文勇,陈铁云,等. 结构流-固冲击屈曲研究进展[J]. 力学进展,1996,26(1):56-67.
GU Wang-ming, TANG Wen-yong, CHEN Tie-yun, et al. Advances in studies on dynamic buckling of structure subjected to fluid-solid impact loading[J]. Advances in Mechanics, 1996,26(1):56-67.
- [35] 卢焯华,郑际嘉. 刚性细长柱体倾斜姿态落水冲击的附加质量法[J]. 华中理工大学学报,1996,24(8):89-93.
LU Chi-hua, ZHENG Ji-jia. A study of water impact against a rigid slender cylinder falling obliquely with the added masses method[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology, 1996,24(8):89-93.
- [36] 卢焯华,郑际嘉. 空投鱼雷倾斜姿态落水冲击研究[J]. 应用力学学报,1996(4):17-23.
LU Chi-hua, ZHENG Ji-jia. On oblique water impact of the air dropped torpedo during water entry[J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 1996(4):17-23.
- [37] 江松青,李永池,陈正翔. 侧向不均匀冲击下环向加筋圆柱壳的动力响应[J]. 计算力学学报,2001,18(4):443-448.
JIANG Song-qing, LI Yong-chi, CHEN Zheng-xiang. Dynamic response of ring-stiffened cylindrical shells under non-uniform lateral impact[J]. Chinese Journal of Computational Mechanics, 2001,18(4):443-448.
- [38] 孙辉,卢焯华,何友声. 二维楔形体冲击入水时的流固耦合响应的实验研究[J]. 水动力学研究与发展,2003,18(1):104-109.
SUN Hui, LU Zhi-hua, HE You-sheng. Experimental research on the fluid-structure interaction in water entry of 2D elastic wedge[J]. Journal of Hydrodynamics, 2003,18(1):104-109.
- [39] Cointe R. Two-dimensional water solid impact[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1989,111:109-114.
- [40] Miloh T. On the oblique water entry problem of a rigid sphere[J]. Journal of Engineering Mathematics, 1991,25(1):77-92.
- [41] Fraenkel L E, McLeod J B. Some results for the entry of a blunt wedge into water[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1997, 355:523-535.
- [42] Zhao R, Faltinsen O. Water entry of two-dimensional bodies[J]. Journal of Fluid Mechanics Digital Archive, 1993(246):593-612.
- [43] Greenhow M, Moyo S. Water entry and exit of horizontal circular cylinders[J]. Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1997,355:551-563.
- [44] Korobkin A A, Pukhnachov V V. Initial stage of water impact[J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1998,20:159-185.
- [45] Wu G X. Hydrodynamic force on a rigid body during impact with liquid[J]. Journal of Fluids and Structures, 1998,12(5):549-559.
- [46] Faltinsen O M. Sea Loads on Ship and Offshore Structures[M]. Cambridge University Press, 1990.
- [47] Xu L, Troesch A W, Peterson R. Asymmetric hydrodynamic impact and dynamic response of vessels[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1999,121(2):83-89.
- [48] Scolan Y M, Korobkin A A. Energy distribution from vertical impact of a three-dimensional solid body onto the flat free surface of an ideal fluid[J]. Journal of Fluids and Structures, 2003,17(2):275-286.
- [49] Cointe R, Armand J L. Hydrodynamic impact analysis of a cylinder[J]. Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, 1989,109:237-243.
- [50] Howison S D, Ockendon J R, Wilson S K. Incompressible water entry problems at small deadrise angles[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1991,222:215-230.
- [51] Wilson S K. A mathematical model for the initial stages of fluid impact in the presence of a cushioning fluid layer[J]. Journal of Engineering Mathematics, 1991(25):265-285.
- [52] Yettou E-M, Desrochers A, Champoux Y. Experimental study on the water impact of a symmetrical wedge[J]. Fluid Dynamics Research, 2006,38(1):47-66.
- [53] Cui S, Cheong H K, Hao H. Experimental study of dynamic post-buckling characteristics of columns under fluid-solid slamming [J]. Engineering Structures, 2000,22(6):647-656.
- [54] Hao H, Cheong H K, Cui S. Analysis of imperfect column buckling under intermediate velocity impact[J]. International Journal of Solids and Structures, 2000,37(38):5297-5313.
- [55] Cheong H K, Hao H, Cui S. Experimental investigation of dynamic post-buckling characteristics of rectangular plates under fluid-

- solid slamming[J]. *Engineering Structures*, 2000(22):947-960.
- [56] Korobkin A A, Peregrine D H. The energy distribution resulting from an impact on a floating body[J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 2000,417:157-181.
- [57] Carcaterra A, Ciappi E, Iafrati A, et al. Shock spectral analysis of elastic systems impacting on the water surface[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2000,229(3):579-605.
- [58] Carcaterra A, Ciappi E. Hydrodynamic shock of elastic structures impacting on the water: Theory and experiments[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 2004,271(1-2):411-439.
- [59] Okada S, Sumi Y. On the water impact and elastic response of a flat plate at small impact angles[J]. *Journal of Marine Science and Technology*, 2000,5:31-39.
- [60] Ermanyuka E V, Ohkusb M. Impact of a disk on shallow water[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2005,20:345-357.
- [61] Peng W, Peregrine D H. Pressure-Impulse Theory for Plate Impact on Water Surface[C]// the 15th International Workshop on Water Waves and Floating Bodies. Caesarea, 2000.
- [62] Anghileri M, Spizzica A. Experimental validation of finite element models for water impacts[C]// Proceedings of the Second International Crash Users Seminar. Cranfield, UK, 1995.
- [63] Faltinsen O, Zhao R. Water entry of ship sections and axisymmetric bodies[C]// AGARD FDP Workshop on High Speed Body Motion in Water. Kiev, Ukraine, 1997.
- [64] Korobkin A A, Wu G X. Impact on a floating circular cylinder[J]. *Proceeding of the Royal Society A*, 2000,456:2489-2514.
- [65] Donguy B, Peseux B, Gornet L, et al. Three dimensional hydroelastic water entry: Preliminary results[C]// Proceedings of the 11th International Offshore and Polar Engineering Conference. Stavanger, Norway, 2001.
- [66] Park M, Jung Y, Park W. Numerical study of the impact force and ricochet behaviour of high speed water entry bodies[J]. *Computers & Fluids*, 2003,32:939-951.
- [67] Battistin D, Iafrati A. A numerical model for the jet flow generated by water impact[J]. *Journal of Engineering Mathematics*, 2004,48:353-374.
- [68] Wu G X, Sun H, He Y S. Numerical simulation and experimental study of water entry of a wedge in free fall motion[J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2004,19(3):277-289.
- [69] Seifl M S, Mousaviraad S M, Saddathosseini S H. A numerical study on the asymmetric water entry of a wedge section[J]. *China Ocean Engineering*, 2004,18(4):595-604.
- [70] Takagi K. Numerical evaluation of three-dimensional water impact by the displacement potential formulation[J]. *Journal of Engineering Mathematics*, 2004,48:339-352.
- [71] Oger G, Doring M, Alessandrini B, et al. Two-dimensional SPH simulations of wedge water entries[J]. *Journal of Computational Physics*, 2005,213:803-822.

Review on research and development of water-entry impact problem

WANG Yong-hu^{*}, SHI Xiu-hua

(*School of Marine Engineering, Northwestern Polytechnical University,
Xi'an 710072, Shaanxi, China*)

Abstract: Water-entry impact and slamming phenomena fall into complicated transient physical problems whether in theoretical analysis or in numerical simulation. Developments of theory, experiment and numerical simulation on water-entry impact problems were summarized by dividing the concerned researches into three stages in terms of time sequence. The studied content and focus at present on water-entry impact and slamming phenomena were introduced, and numerical modeling techniques were highlighted particularly. Researched results can provide a reference for the further investigation on water-entry impact problems in manned and unmanned spaceflight and marine domains.

Key words: fluid mechanics; research and development; review; water entry; impact; slamming; impact load

* Corresponding author: WANG Yong-hu
E-mail address: wangyh.cn@gmail.com