

航行体高速入水问题研究综述

王浩宇¹, 李木易¹, 程少华², 张晨星²

(1. 海装重大专项装备项目管理中心, 北京 100071;
2. 北京宇航系统工程研究所, 北京 100076)

摘要: 从理论研究、实验研究和数值仿真研究 3 个方面综述了航行体高速入水问题的研究进展。入水问题研究可分为入水冲击、空泡的形成演化以及入水弹道 3 个方向。在入水冲击研究方面, 概述了入水冲击的理论计算方法、数值仿真方法以及入水冲击实验的研究进展; 在入水空泡研究方面, 概述了空泡的形成理论与形态演化模型、入水空泡实验以及数值仿真研究成果; 在入水弹道研究方面, 概述了入水弹道稳定性的实验、数值仿真研究情况。在此基础上, 提出了后续入水研究发展重点方向。

关键词: 入水; 空泡演化; 入水冲击; 入水弹道

中图分类号: O351.2

文献标识码: A

文章编号: 2096-4080 (2021) 03-0065-06

Review of Vehicle's High-Speed Water Entry

WANG Haoyu¹, LI MUYI¹, CHENG Shaohua², ZHANG Chenxing²

(1. Project Management Center, Major Special Equipment of Marine Equipment, Beijing 100071, China;
2. Beijing Institute of Aerospace Systems Engineering, Beijing 100076, China)

Abstract: The research progress of the high-speed water entry of the vehicle is reviewed from three aspects: theoretical research, experimental research and numerical simulation research. The study of water entry can be divided into three directions: water entry impact, water entry cavity's formation and evolution, and water entry trajectory. In the aspect of water entry impact, the theoretical calculation method, the numerical simulation method and the experimental research progress of water entry impact are summarized. In the aspect of water entry cavity, the formation theory and evolution model of cavity, the result of water entry cavity's experiment and numerical simulation are summarized. In the aspect of water entry trajectory, the experiment and numerical simulation of the stability of water entry trajectory are summarized. On this basis, the key directions of water entry research are put forward.

Key words: Water entry; Evolution of cavity; Water entry impact; Water entry trajectory

0 引言

航行体经由空气介质穿越水空界面, 进入水中的过程称为入水过程。入水过程中固、液、气耦合作用产生入水冲击、空泡多相流动、自然空化等一系列复杂物理现象。自然界与工程应用中

的很多现象均与入水问题相关, 如翠鸟入水捕鱼、蛇及蜥蜴水面行走、鱼雷空投入水、水上飞机水面着陆、船舶海浪抨击、火箭助推器及航天器海上回收等。在工程项目研制的推动下, 工程师和学者针对入水问题开展了大量的研究工作。根据关注力学效应的不同, 对入水问题的研究可分为 3

收稿日期: 2020-12-20; 修订日期: 2021-03-21

作者简介: 王浩宇 (1981-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为海军装备研究。E-mail: wanghaoyu2015@126.com

个方向：入水冲击、入水空泡和入水弹道。根据研究手段的不同，对入水问题的研究可分为3个方面：理论研究、实验研究和数值仿真研究。

由于入水过程中的流体动力具有高度的非线性和非定常性，采用理论模型对入水过程进行精确地描述较为困难。因此入水问题的早期研究多以实验手段开展。早在1883年，为增加炮弹的射程，法国海军曾研究过弹丸在水面上的跳弹过程^[1]。最早系统地对航行体入水开展实验研究的是英国学者Worthington等^[2]，其通过高速闪光相机对球体落入液体中所产生的喷溅进行了拍摄，得到大量的球体入水图像。对入水问题的实验研究主要关注不同外形航行体入水过程中的入水冲击、入水空泡的动态演化以及入水弹道特性。在大量实验数据的基础上，通过对入水流动采取合理的假设，学者们得到了入水冲击力等物理量的理论计算公式以及空泡形态发展演化的理论模型，揭示了航行体入水过程中的流动机理。受限于实验条件和实验成本的限制，某些条件的航行体入水过程无法通过实验手段开展研究。随着计算机技术的发展和流体力学数值计算方法的成熟，数值仿真方法成为研究航行体入水的重要手段并得到了广泛的运用。相比实验和理论，数值仿真方法能够考虑更多物理参数对结果的影响，同时能够获取更为全面精细的流场特征信息，且数值仿真研究的成本较低。早期对入水问题的数值仿真研究，以采用边界元方法求解入水势流理论模型为主。目前，学者们多以求解N-S方程、Euler方程等对航行体入水过程进行数值模拟。传统的N-S方程和Euler求解方法包括有限差分法、有限元法、有限体积法和流体体积法。随着技术的进步，无网格方法如SPH方法、流固耦合方法如ALE算法等逐渐应用于入水问题求解之中。

本文对入水问题的研究进展进行了综述，提出了入水问题后续重点发展方向，为入水问题的进一步研究及水中兵器的研制提供参考。

1 入水冲击研究

在对入水冲击的实验研究方面，Bottomley^[3]利用水上飞机的V型浮舟模型进行跌落实验，并且根据测得的加速度曲线分析了水上着陆时飞机受到的最大冲击力。Watanabe^[4]开展了带有锥形、球形等典型头型航行体的低速入水实验，得到了

入水过程中最大阻力系数同入水速度的关系以及入水载荷的冲击特性。Johnson^[5]研究了空气的可压缩性对入水冲击的影响。钝锥头型航行体的入水冲击载荷受到气垫效应的影响较大，Verhagen^[6]在研究平板入水问题时，发现平板与自由液面之间的气体来不及排出形成气垫层，降低了平板的入水冲击载荷，并最终破碎成离散的气泡。水中气泡的存在使得水中声速降低、流体的可压缩性增大。Bullock等^[7]研究了平板进入气水混合物的过程，发现水中气泡的存在会显著降低入水冲击载荷。Lange等^[8]针对圆柱体水平进入含气泡水体中的过程开展了实验研究。

在实验数据的基础上，结合能量守恒定理、动量守恒定理和势流理论等，学者们对入水冲击开展了理论研究。Von Karman^[9]基于水上飞机的落水冲击实验数据，将水上飞机简化为二维楔形体，引入附加质量的概念，基于动量守恒定理将航行体入水过程中的动量减少量等同于受冲击流场动量的增加量，推导出了飞机落水着陆过程中的冲击压力计算公式。Wagner^[10]对Von Karman的理论进行了改进，基于势流理论，对伯努利方程和自由液面边界条件进行线性化处理，引入水波因子的概念，考虑了入水过程中水面的提升和喷溅的厚度，分析了带有小斜升角的二维楔形体的垂直入水冲击，计算得到了较为精确的冲击载荷。Yu^[11]在应用水波因子时考虑了三维效应的影响，对Wagner的理论作了进一步的发展。Logvinovich等^[12]和Korobkin^[13]通过在边界条件及伯努利方程中引入高阶项对Wagner的理论进行了改进，消除了物体边缘处畸变的压力和速度。Watanabe^[14]采用渐进匹配法完善了Wagner的理论，渐进匹配将流场划分为内流域、外流域和射流区域，首先对内流域和射流区域内的射流进行分析，而后对外流域采用近似平板理论对内外流域的压力进行匹配，进而得到物面上完整的压力分布。早期对入水冲击的理论研究通常忽略了空气和水的黏性与可压缩性，对于高速入水的航行体，水的可压缩性往往不可忽略。针对圆锥、圆盘以及钝头体等高速撞击可压缩性自由液面的问题，学者们开展了一系列的研究工作^[15-17]。

在数值仿真研究方面，学者们针对平板、圆柱、圆球等多种几何外形的航行体入水过程进行了仿真计算，得到了航行体入水过程中的流场形

态、冲击载荷等结果。Oger 等^[18]采用 SPH 方法研究了楔形体入水冲击问题；Ma 等^[19]采用 SPH 方法计算得到了回转体的入水冲击过程；沈雁鸣等^[20]采用变光滑长度 SPH 方法开展了二维楔形体入水冲击计算，显著提高了 SPH 方法的计算效率；刘华坪等^[21]基于 VOF 多相流模型计算了鱼雷的入水冲击载荷特性；张岳青等^[22]开展了楔形和弧形结构入水试验，获得了冲击载荷特性，并采用 ALE 方法开展了试验工况的数值仿真，仿真结果和试验结果一致性较好。

2 入水空泡研究

在航行体入水的过程中，若航行体的冲击动能远大于扰动水面所需的表面张力能，则水面下方的航行体周围往往会形成一个空穴，这个空穴为入水空泡。图 1 为典型的球体入水空泡图像^[23]。空泡形成之后，一般要经历发展、闭合以及溃灭等演化阶段。空泡在动态演化过程中主要受到水的表面张力、重力引起的压差力和航行体运动引起的撞击力的作用。其中，空气域的压力会影响空泡受到的压差力，进而影响空泡的演化过程；航行体的头型、尺寸、入水速度和入水角度等则会影响航行体运动时对水体的作用力，因而对航行体入水空泡的演化也会产生较大的影响。表面张力在球体尺寸较小，入水速度较低的情况下会对航行体入水空泡的演化过程产生一定的影响。



图 1 球体入水空泡演化图像

Fig. 1 The evolution of sphere's water entry cavity

入水空泡的研究方面，学者们重点关注空泡的形成机理、不同因素对空泡形态演化的影响规律等问题。在 Worthington 等^[2]的研究中，发现球体表面的沾湿与否对球体入水过程产生的喷溅形态有较大的影响。受到该研究的启发，May^[24]开展了表面洁净程度不同以及表面涂有不同黏性液体的球体入水实验，发现污浊表面以及涂有高黏性液体的表面有助于入水空泡的形成；进一步，借助于材料表面涂层技术的发展，Duez 等^[25]指出

航行体的表面特性主要体现为航行体表面的浸润特性，即航行体表面的亲/疏水特性，该特性可利用表面接触角来表征。通过实验得出了球体入水空泡产生所需的临界速度与表面接触角的关系。

随着实验技术的进步，学者们得以开展更多工况下的航行体入水实验，捕捉到更丰富、更精细的流场信息；Abelson^[26]将压力传感器应用于航行体入水问题的研究，测量了锥头圆柱体入水过程中空泡内的压力。此前，学者们认为入水空泡内的压降约为泡内气体流动的动压 $0.5\rho_a v^2$ ，但 Abelson 的测量结果表明，泡内的实际压降要比 $0.5\rho_a v^2$ 高出一个量级。Truscott 等^[27]开展了旋转小球与半疏水/半亲水性小球的入水实验，发现两种情形下入水空泡的形态较为一致。高速摄影技术的发展使得航行体高速入水问题得到关注。其中，Lundstrom 等^[28]开展了不同口径穿甲弹的高速入水实验，航行体的入水速度达到了 1 070 m/s。Truscott 等^[29]开展了射弹小角度高速入水实验，发现航行体高速入水形成的空泡与低速情形下不同，高速入水空泡内往往含有大量的水蒸气。

空泡形态的理论研究方面，Birkhoff 等^[30]利用摄影技术研究了航行体入水时的速度场，发现空泡壁面的运动是纯径向的。在此基础上，Birkhoff 等^[31]提出了一个垂直入水空泡模型，假设在任何深度上航行体造成的流动仅在以入水点为中心并包含航行体在内的一个薄球壳里发生，航行体传给球壳内水的能量等于该球壳层内水的动能与势能之和；May^[32]在实验数据的基础上提出了理想空泡模型，认为空泡的截面半径和航行体头部直径及阻力系数有关；Logvinovich 等^[12]提出了空泡截面独立膨胀原理，指出空泡每个横截面相对于航行体中心的轨迹扩展，与航行体前后的运动基本无关，且空泡的膨胀仅取决于无穷远处压力与空泡内压力的差异、航行体经过空泡横截面时的速度、航行体的直径和阻力；Lee 等^[33]基于能量守恒原理，将航行体入水时动能的减少量等同于空泡动能和势能的增加量，建立了航行体高速入水过程的空泡动力学方程，推导出了空泡直径的变化公式；Duclaux 等^[34]基于 Besant-Rayleigh 方程对小球入水空泡形态进行了计算，理论计算结果和实验结果较为一致。

国内对入水空泡的研究起步较晚，但也取得了大量的研究成果。何春涛等^[35]开展了圆柱体不

同攻角、不同速度下的入水实验,分析了圆柱体入水空泡的形成机理与演化过程,得到了空泡的闭合方式与入水速度的关系。马庆鹏等^[23]针对球体不同速度下的入水过程开展了实验研究,得到了球体入水空泡的发展演化过程,分析了入水速度与表面沾湿状态对球体入水空泡演化的影响。杜严锋等^[36]基于实验得到的球体入水弹道和空泡形态数据,验证了基于空泡截面独立膨胀原理建立的空泡形态数学模型的可信性。黄超等^[37]针对不同直径的超疏水性球体开展了入水实验研究,得到了小球漂浮振荡、准静态空泡、浅闭合空泡、深闭合空泡和表面闭合空泡5种类型的空泡动力学行为。李达钦等^[38]针对不同密度比的疏水性球体开展了垂直入水实验,研究了球体入水空泡特性及流动动力特性。路中磊等^[39]开展了开放腔体圆柱壳垂直入水实验,分析了入水空泡流动特征和机理。

入水空泡的数值仿真研究方面,陈九锡等^[40]采用MAC方法对平头航行体垂直匀速入水过程中空泡的发展过程进行了计算。陈学农等^[41]采用时间步进法和边界积分方程方法求解了平头航行体的垂直及斜入水过程。王聪等^[42]采用VOF多相流模型对锥头圆柱体的入水过程进行了仿真计算,研究了空气压强对球体入水空泡形态的影响。马庆鹏等^[43]对不同头型的锥头圆柱体高速入水过程开展了仿真计算,研究了头型对柱体入水空泡形态、流场压力分布以及弹道的影响。孙钊等^[44]对不同亲疏水性小球以及半疏水-半亲水性小球的入水过程进行了仿真计算,研究了亲/疏水性对球体入水空泡形态的影响。夏维学等^[45]对不同密度、不同速度的高速旋转小球的入水过程进行数值模拟,分析了球体旋转入水空泡的演化过程。李国良等^[46]应用Tait方程,研究了水的可压缩性对旋成体高速入水过程的影响。

3 入水弹道研究

入水弹道的研究方面,弹道稳定性是学者们重点关注的对象。矾部孝^[47]通过大量的实验研究发现,尖头航行体的水下弹道一般不稳定,而平头航行体的弹道则基本保持直线,较为稳定。Truscott等^[29]通过研究发现高速射弹的入水弹道主要受到射弹头型和长细比的影响。Shi等^[48]开展了球体以350 m/s速度垂直入水的实验,研究了造

成球体高速垂直入水过程中弹道发生偏转的原因。张伟等^[49]研究了平头、卵形和截卵形3种不同头型对高速射弹入水稳定性的影响。王云等^[50]进一步研究了椭圆斜截头、锥形平头、平头和椭圆平头4种不同头型、入水角度和入水速度对射弹水下弹道的影响。路丽睿等^[51]通过试验对比了锥头和半球头射弹的入水弹道特性,发现半球头射弹入水弹道的稳定性较差。侯宇等^[52]研究了侧滑角对射弹高速小角度入水弹道的影响,发现随着侧滑角的增大,射弹入水弹道的稳定性逐渐降低。此外,基于弹道学、入水空泡流体动力学以及流场-弹道耦合计算模型,学者针对不同外形航行体的入水弹道特性开展了一系列的仿真计算研究^[44-45,53-54]。

4 结论及后续研究方向

航行体高速入水研究方面,国内外的学者从理论、实验以及数值仿真3个方面开展了较为全面的研究工作,取得了大量的研究成果:

- 1) 通过多种外形物体以不同速度和姿态的入水过程实验,借助高速摄影技术、PIV技术、阴影和纹影技术、惯性传感器和压力传感器等,获取了物体入水空泡流场形态、冲击载荷以及泡内压力等试验数据,研究了空泡演化机理、物体入水冲击特性等,分析了物体表面材料特性、水的可压缩性、气垫以及水中含气量等因素对物体入水过程的影响;

- 2) 结合实验数据,基于动量守恒定律、能量守恒定律、热力学第一定律和势流理论等,建立了物体入水过程中冲击载荷的计算公式、阻力系数的经验公式、入水空泡形成准则、空泡形态计算模型以及泡内压力演化模型等;

- 3) 通过数值求解入水多相流动的N-S方程、Euler方程等,开展了多种工况的入水仿真计算,拓宽了物体入水问题的研究边界,获得了丰富细致的流场信息,系统全面地研究了不同因素对航行体入水过程的影响机理及规律。

目前,随着实验技术、数值仿真技术的进步,后续对航行体入水问题研究的重点方向包括:

- 1) 开展大口径航行体高速入水过程的研究,分析超声速条件下航行体入水过程中流场的演化特性、载荷特性以及弹道稳定性;

- 2) 开展刚柔组合体缓冲入水冲击过程的流固

耦合计算,为航行体高速入水的降载增稳提供参考;

3) 开展复杂外形及可变构型航行体入水弹道特性研究,分析复杂航行体结构和构型改变对航行体入水弹道稳定性和入水空泡形态演化过程的影响规律。

参考文献

- [1] 严忠汉. 试论鱼雷入水问题[J]. 中国造船, 2002, 43(3):88-93.
- [2] Worthington A M, Cole R S. Impact with a liquid surface, studied by the aid of instantaneous photography[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society a Mathematical Physical and Engineering Sciences, 1900, 194(252-261):175-199.
- [3] Bottom G H. The impact of a model seaplane float on water[R]. Reports and Memoranda, No. 583, 1919.
- [4] Watanabe S. Resistance of impact on water surface. Part V-sphere[J]. Scientific papers of the Institute of Physical and Chemical Research of Japan, 1934, 23(484): 202-208.
- [5] Johnson R S. A modern introduction to the mathematical theory of water waves[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997.
- [6] Verhagen J H G. The impact of a flat plate on a water surface[J]. Journal of Ship Research, 1967, 11(4): 211-223.
- [7] Bullock G N, Grawford A R, Hewson P J, et al. The influence of air and scale on wave impact pressures[J]. Coastal Engineering, 2001, 42(4):291-312.
- [8] Lange N A, Rung T. Impact tests in pure and aerated water[C]. ASME 2011 30th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Rotterdam, The Netherlands, 2011:559-567.
- [9] Von Karman T. The impact on seaplane floats during landing[R]. NACA TN 321, 1929.
- [10] Wanger H. Transient phenomena associated with impacts and sliding on liquid surfaces[J]. Math Mech, 1932, 12(4):193-512.
- [11] Yu Yee-Tak. Virtual masses of rectangular plates and parallelepipeds in water[J]. Journal of Applied Physics, 1945, 16(11):724-730.
- [12] Logvinovich G V, Buyvol V N, Dudko A S. Free boundary flows[M]. Kiev, Russian: Naukova Dumka Publishing House, 1985.
- [13] Korobin A. Analytical models of water impact[J]. European Journal of Applied Mathematics, 2004, 15(6):821-838.
- [14] Watanabe I. Analytical expression of hydrodynamic impact pressure by matched asymptotic expansion technique[C]. Transactions of the West-Japan Society of Naval Architects 71. The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers, 1986:77-85.
- [15] Egorov L T. Impact on a compressible fluid[R]. National Advisory Committee for Aeronautics, 1958.
- [16] Korobkin A. Blunt-body impact on a compressible liquid surface[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1992, 244:437-453.
- [17] Poruchikov V B. Impact of a disk on the surface of an ideal compressible fluid[J]. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1964, 28(4):970-974.
- [18] Oger G, Doring M, Alessandrini B, et al. Two-dimensional SPH simulations of wedge water entries[J]. Journal of Computational Physics, 2006, 213(2):803-822.
- [19] Ma L, Zhao X, Liu H. Two-phase SPH simulation of vertical water entry of a two dimensional structure[J]. Journal of Hydrodynamics, 2018, 30(5): 841-850.
- [20] 沈雁鸣, 施文奎, 陈坚强, 等. 变光滑长度 SPH 方法在入水冲击中的应用研究[J]. 船舶力学, 2020, 24(3):323-331.
- [21] 刘华坪, 余飞鹏, 张岳青, 等. 不同头型鱼雷入水冲击载荷研究[J]. 水下无人系统学报, 2018, 26(6): 527-532.
- [22] 张岳青, 白治宁, 曾小凡, 等. 楔形和弧形结构入水冲击响应研究[J]. 船舶力学, 2020, 24(3):400-408.
- [23] 马庆鹏, 何春涛, 王聪, 等. 球体垂直入水空泡实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2014, 34(2):174-180.
- [24] May A. Effect of surface condition of a sphere on its water entry cavity[J]. Journal of Applied Physics, 1951, 22(10):1219-1222.
- [25] Duez C, Ybert C, Clanet C, et al. Making a splash with water repellency[J]. Nature Physics, 2007, 3(3): 180-183.
- [26] Abelson H I. Pressure measurements in the water-entry cavity[J]. Journal of Fluid Mechanics, 1970, 44(1):129-144.
- [27] Truscott T T, Techet A H. A spin on cavity formation during water entry of hydrophobic and hydrophilic spheres[J]. Physics of Fluids, 2009, 21(12): 1-4.
- [28] Lundstrom E A, Fung W K. Fluid dynamic analysis of hydraulic ram III. AD 031644 [R]. Washinton, DC: Joint Technical Coordinating Group for Aircraft

- Sur-vivability, 1976.
- [29] Truscott T T, Beal D N, Techet A H. Shallow angle water entry of ballistic projectile[C]. Proceedings of the 7th International Symposium on Cavitation, 2009: 17-22.
- [30] Birkhoff G, Caywood T E. Fluid flow patterns[J]. Journal of Applied Physics, 1949, 20(7): 646-659.
- [31] Birkhoff G, Robert I. Transient cavities in air-water entry[R]. Navord Report 1490, 1951.
- [32] May A. The cavity after vertical water entry[R]. AD 679905, 1968.
- [33] Lee M, Longoria R G, Wilson D E. Cavity dynamics in high-speed water entry[J]. Physics of Fluids, 1997, 9(3): 540-550.
- [34] Duclaux V, Caille F, Duez C, et al. Dynamics of transient cavities[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007, 591: 1-19.
- [35] 何春涛, 王聪, 何乾坤, 等. 圆柱体低速入水空泡试验研究[J]. 物理学报, 2012, 61(13): 281-288.
- [36] 杜严锋, 王聪, 李佳川, 等. 球体入水空泡动态特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(10): 118-123.
- [37] 黄超, 翁翕, 刘谋斌. 超疏水小球低速入水空泡研究[J]. 力学学报, 2019, 51(1): 36-45.
- [38] 李达钦, 王国玉, 张敏弟, 等. 不同密度比球体入水空泡流体动力特性研究[J]. 宇航总体技术, 2019, 3(1): 29-38.
- [39] 路中磊, 魏英杰, 王聪, 等. 基于高速摄像实验的开放腔体圆柱壳入水空泡流动研究[J]. 物理学报, 2016, 65(1): 309-323.
- [40] 陈九锡, 颜开. 用 MAC 方法计算平头物体垂直等速入水空泡[J]. 水动力学研究与进展, 1985(1): 17-26.
- [41] 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): 129-138.
- [42] 王聪, 何春涛, 权晓波, 等. 空气压强对垂直入水空泡影响的数值研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2012, 44(5): 14-19.
- [43] 马庆鹏, 魏英杰, 王聪, 等. 锥头圆柱体高速入水空泡数值模拟[J]. 北京航空航天大学学报, 2014, 40(2): 204-209.
- [44] 孙钊, 曹伟, 王聪, 等. 半疏水-半亲水球体垂直入水空泡数值仿真研究[J]. 兵工学报, 2017, 38(5): 968-977.
- [45] 夏维学, 王聪, 魏英杰, 等. 高速旋转小球入水空泡特性数值模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(4): 138-144.
- [46] 李国良, 尤天庆, 孔德才, 等. 旋成体高速入水可压缩性影响研究[J]. 兵工学报, 2020, 41(4): 720-729.
- [47] 矾部孝. 水下弹道的研究[M]. 周佩芬, 译. 北京: 国防工业出版社, 1983.
- [48] Shi H-H, Takami T. Some progress in the study of the water entry phenomenon [J]. Experiments in Fluid, 2001, 30(4): 475-477.
- [49] 张伟, 郭子涛, 肖新科, 等. 弹体高速入水特性实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2011, 31(6): 579-584.
- [50] 王云, 袁绪龙, 吕策. 弹体高速入水弯曲弹道实验研究[J]. 兵工学报, 2014, 35(12): 1998-2002.
- [51] 路丽睿, 魏英杰, 王聪, 等. 不同头型射弹低速倾斜入水空泡及弹道特性研究[J]. 兵工学报, 2018, 39(7): 1364-1371.
- [52] 侯宇, 黄振贵, 郭则庆, 等. 超空泡射弹小角度高速斜入水试验研究[J]. 兵工学报, 2020, 41(2): 332-341.
- [53] 李佳川, 魏英杰, 王聪, 等. 不同扰动角速度高速射弹入水弹道特性[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 40(4): 131-136.
- [54] 肖海燕, 罗松, 朱珠, 等. 高速射弹小角度入水弹道特性研究[J]. 北京理工大学学报, 2019, 39(8): 784-791.

引用格式: 王浩宇, 李木易, 程少华, 等. 航行体高速入水问题研究综述[J]. 宇航总体技术, 2021, 5(3): 65-70.

Citation: Wang H Y, Li M Y, Cheng S H, et al. Review of vehicle's high-speed water entry [J]. Astronautical Systems Engineering Technology, 2021, 5(3): 65-70.