

# 国外水洞试验设备建设研究综述

战培国\*, 王培

中国空气动力研究与发展中心 计算空气动力研究所, 四川 绵阳, 621000

**摘要:** 水洞是水流体动力学研究的主要试验设备, 也是空气动力学基础研究的辅助设备。在概述水和空气物理特性差异的基础上, 归纳了不同用途水洞的主要形式、特点; 介绍了3种有代表性的水流体试验设备, 为国内水流体试验设备和空气动力学基础研究设备发展提供参考。

**关键词:** 水洞; 拖曳水槽; 水上试验; 流体力学; 空气动力学

中图分类号: V 211.76 文献标识码: A 文章编号: 1007-5453 (2016) 01-0001-06

水洞是水流体力学研究的主要试验设备。水洞的试验流体介质为水(或油), 主要用于研究水的空化现象、水弹性、自由液面、舰船运动、水中推进、水利机械等水流体动力学问题, 亦称为空化水洞。与空气相比, 水具有高密度、低质量扩散和低流速的特性。这些特性使水洞比风洞更加适合某些空气动力学问题的观察分析研究, 如飞行器大迎角涡的产生和脱落、微型飞行器扑翼运动等。因此, 水洞也广泛应用于空气动力学基础研究领域。

## 1 水和空气的基本运动特性

水和空气的运动特性相差巨大, 水的密度是空气的800多倍, 动力黏性系数50多倍, 声音在水中的传播速度是在空气中的约4倍。水用于空气动力研究和空气用于水流体动力研究会产生不同的效果。在200℃、标准大气压下, 水和空气的运动特性如表1所示。

缩尺模型流体力学试验研究需要满足3个相似条件, 即: 几何相似、运动相似和动力相似。通常, 典型的流体运动问题涉及一些变量, 如: 模型特征长度( $D$ )、自由流速度( $U$ )、静态压力( $p$ )、密度( $\rho$ )、动力粘性系数( $\mu$ )、重力加速度( $g$ )、涡脱落频率( $\omega$ )、声速( $a$ )、表面张力( $\sigma$ )。

根据缩尺模型试验要求的动力相似原则, 这些变量可以组合成模型流体力学试验的重要无量纲参数(见表2)。这些参数对确保模型流体力学试验结果的正确性具有重要意义。

表1 水和空气特性比较

Table 1 Characteristic comparison of water and air

特性	水	空气	水与空气比
密度/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$ )	998.2	1.204	829.1
动力黏性系数/( $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ )	$1.002 \times 10^{-3}$	$1.813 \times 10^{-5}$	55.27
运动黏性系数/( $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$ )	$1.003 \times 10^{-6}$	$1.506 \times 10^{-5}$	0.0666
声速/( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ )	1482	343.2	4.318

表2 模型试验的重要相似参数

Table 2 Important similar parameters of model test

名称	表达式	释义	应用
雷诺数 $Re$	$\frac{\rho U D}{\mu}$	惯性力与黏性力之比	所有流体动力学流动
马赫数 $Ma$	$\frac{U}{a}$	流速与声速之比; 惯性力与可压缩力之比	压缩性不可忽视的流动
斯德鲁哈尔数 $St$	$\frac{\omega D}{U}$	波长与长度缩尺之比; 当地惯性力与对流惯性力之比	具有振荡特征频率的非定常流
弗鲁德数 $Fr$	$\frac{U}{\sqrt{gD}}$	惯性力与重力之比	具有自由表面的流动
韦伯数 $We$	$\frac{\rho U^2 D}{\sigma}$	惯性力与表面张力之比	表面张力不可忽视的流动

## 2 水洞的主要类型

水洞功能和结构形式多种多样, 初步可以按以下几种形式划分:

收稿日期: 2015-06-18; 录用日期: 2015-07-26

\*通讯作者. Tel.: 0816-2463158 E-mail: zpg63@163.com

引用格式: ZHAN Peiguo, WANG Pei. Review of foreign water tunnel test equipment construction research[J]. Aeronautical Science & Technology, 2016, 27(01): 01-06. 战培国, 王培. 国外水洞试验设备建设研究综述[J]. 航空科学技术, 2016, 27(01): 01-06.

(1) 按用途功能:

(a) 用于水流体动力研究的水洞(流速较高);

(b) 用于空气动力学研究的水洞(流速较低)。

(2) 试验段形式

(a) 无自由水面的水洞和有自由水面的水洞,即:试验段内充满水或未充满水;

(b) 水平试验段和立式试验段水洞,即:试验段水平设置或垂直设置。

(3) 回路形式

(a) 回流、重力式或非重力式(压力可调);

(b) 非回流、重力式。

用于水流体力学空蚀、空化等研究的水洞具有与常规水洞(或风洞)不同的两种系统:

(1) 空气重溶系统,当试验段中水发生空化时,重溶从水中释放出来的气泡。

(2) 含气量控制系统,使水流重溶解空气量保持为所需要的常量。

压力可调水洞调压方式是水洞上游顶部的密闭箱中有自由水面,水面上有空气,与真空泵连接。抽出空气时,可以降低试验段中的压强,也可以增加试验段中的压强。水洞有除气系统,以减少水中的空气含量,水通过管路进入除气塔,除气后回到水洞。水洞的过滤系统使水保持清洁,水洞的测控系统可以调控水流速度和压力。

水洞中的流动介质是液态水,其密度和黏性系数远大

于空气,但与风洞相比,水洞试验段尺寸小,试验速度低,雷诺数相对也比较低,水洞实验研究的现象与低速风洞实验研究的现象类似。水洞适宜研究涡、湍流以及舰船模型等的相关实验。由于水流比较均匀,粒子容易撒播,而且流动速度较慢,在水洞中更容易实现流动显示和PIV等光学测量技术<sup>[1]</sup>。水洞也适合进行某些动态试验<sup>[2]</sup>。

值得注意的是,由于用于空气动力学研究的水洞试验雷诺数较低,具体到某个空气动力试验项目是否适合在水洞中进行,需要根据相似准则和实践经验具体分析。

### 3 主要水洞设备

1896年,英国C.A.帕森斯建造了世界上第一个研究空化的小型水洞,该水洞为铜制,全长1m,试验段为0.15m×0.15m。目前,世界上大约有二百多座不同类型和用途的水洞,分布于30个国家的科研院所中,主要用于船舶/潜体等流体动力学研究和空气动力学基础研究。

表3和表4分别给出了国外部分主要水洞设备和拖曳水槽设备<sup>[3]</sup>。其中:

(1) 具有自由水面试验段的最大水洞是德国柏林水工和造船研究所的,试验段5m×3m,长10m,试验速度12m/s。

(2) 无自由水面试验段的最大水洞是俄罗斯圣彼得堡KPy0B-3水洞,其试验段1.3m×1.3m,流速为15m/s。

(3) 美国宾州大学超高速水洞(也称为文丘里环)的流速为最高,其速度为83.8m/s,试验段截面为 $\phi$ 0.04m。

表3 国外部分水洞设备  
Table 3 Some of the water tunnel abroad

国家	单位	设备名称	试验段尺寸	试验速度/(m/s)	主要用途	
美国	宾夕法尼亚州立大学	加菲尔	小水洞	直径0.304m	24.38	流体力学
		托马斯	小水洞	直径0.152m	21.34	
		水洞	超高速水洞	直径0.038m	83.8	
	NASA阿姆斯特朗飞行研究中心	流动显示设备(FVF)	0.4m×0.6m(立式) 0.6m×2.0m(水平)	4.8, 最佳速度0.08	空气动力学	
	NASA兰利研究中心	水洞	0.4m×0.6m,长1.8m	0.23	空气动力学	
	NASA格林研究中心	水洞	直径0.2 m	0.3, 最佳速度0.08~0.16	空气动力学	
	诺斯罗普·格鲁门公司	水洞	0.41m×0.61m, 长1.83m	0.09~0.12	空气动力学	
	Eidetic飞机公司	水洞	0.61 m×0.91m, 长1.83m	0.305	空气动力学	
	海军水面作战中心(NSWC)	36英寸水洞	直径0.9m	25.7	流体力学	
	空军研究实验室(AFRL)	水平自由水面水洞(HFWT)	0.45m×0.61m	0.3	流体力学	
海军大卫·泰勒模型水池	变压水洞	直径0.6m	18	流体力学		

国家	单位	设备名称	试验段尺寸	试验速度/(m/s)	主要用途
俄罗斯		圣彼得堡 KPy0B-3水洞	1.3m×1.3m	15	流体力学
加拿大	国家研究委员会(NRC)	流动显示水洞(FVWT)	0.254m×0.33m,长0.8m	0.06~3	空气动力学
	曼尼托巴大学	水洞	0.7m×0.762m,长1.83m	1.16	空气动力学
澳大利亚	航空研究实验室(ARL)	水洞	0.25 m×0.25m,长0.75m	0.04~0.75	空气动力学
		水洞	0.38 m×0.51m, 长1.52m	0.04~0.36	空气动力学
	国防科学技术组织(DSTO)	DSTO水洞	0.38 m×0.51m, 长1.63m	0.6	空气动力学
德国	德国宇航院(DLR)	小水洞	0.26 m×0.33 m,长1.26 m	0.5	空气动力学
	德国柏林水工和造船研究所	水洞	5m×3m, 长10m	12	流体力学
瑞士	水力机械实验室	高速水洞	0.15m×0.15m,长0.75 m	50	流体力学
挪威	挪威科技大学	水洞	直径1.20 m,长2.08 m	18	流体力学
		空化水洞	0.9 m×0.9 m, 长4m	10~11	流体力学
荷兰	荷兰海事研究所		直径0.040 m	65	流体力学
		高速水洞	0.05m×0.05 m	40	流体力学
			0.04m×0.08 m	35	流体力学
波兰	弗罗茨瓦夫理工大学	水洞	0.61m×0.9 m, 长15m	12	流体力学

表4 国外主要拖曳水槽  
Table 4 Major foreign towing tank

国家	单位	设备名称	设备参数	主要用途
美国	海军-大卫·泰勒	深水槽	长854.7m, 宽15.5m, 深6.7m	船舶、航空航天飞行器
		浅水槽	长92.3m, 宽15.5m, 深3m	
		高速水槽	长904.6m, 宽6.4m, 拖曳速度30.8 m/s	
		43.2m水槽	长43.2m, 宽3m, 深7.8m	
		循环水槽	长19.3m, 宽6.7m, 拖曳速度5.1m/s	
澳大利亚	澳大利亚海事学院	水槽	长35m, 宽12 m, 深1.0 m, 拖曳速度3.8 m/s	船舶、水利机械
		水槽	长100m, 宽3.5m, 深1.6 m, 拖曳速度4.6m/s	
德国	德国汉堡船模水池实验室	三角洲水池	长50m, 宽50m	船舶、水利机械
		海洋水池	长80m, 宽 50m, 深10m	
		海洋水池	长20 m, 宽30m, 深3~12m	
		浅水池	长35 m, 宽25m, 深0.8m	
俄罗斯	俄罗斯航空航天研究院	水槽	长84m, 宽12m, 深6m, 拖曳速度12m/s	航空航天飞行器

#### 4 典型的三种水流体力学试验设备实例

分析研究国外资料,水流体动力学试验设备可归为3类:水洞,通过制造水流进行模型试验;拖曳水槽或水池,可

以模拟水浪,通过拖曳装置拖动模型在水槽(池)内运动进行试验;湖泊水上漂浮弹射装置,该装置在户外自然水域使用,通过漂浮在水面上的发射装置射出模型进行试验。

## (1) 水洞

## (a) 空气动力学研究水洞

1983年,美国航空航天局(NASA)阿莫斯特朗飞行研究中心建成FVF水洞(见图1),该设备具有垂直(主要)和水平(辅助)两个试验段,性能参数如表3所示。主要用于飞行器大攻角空气动力学研究<sup>[5]</sup>,可视化分析飞机模型大攻角时涡流发展情况。水洞流动显示可以帮助确定涡流的强度、位置,研究控制方法。该设备进行过F-15,F-18,X-29A,X-31等大量飞行器流动显示和动态试验研究。

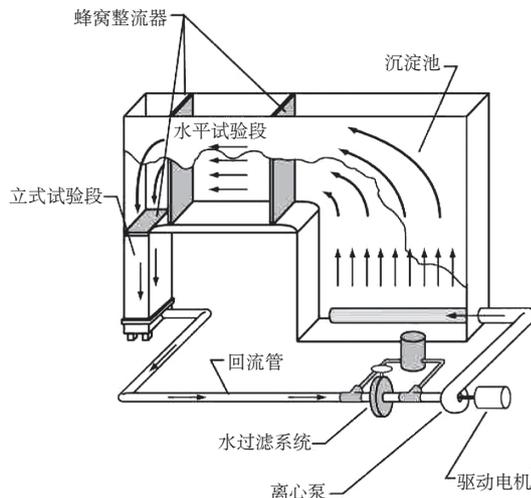


图1 美国NASA的FVF水洞  
Fig.1 FVF water tunnel of NASA

用于空气动力学研究的水洞构造相对简单,一般都是重力式水洞,压力不可调,试验段尺寸较小,试验流速较低(每秒零点零几米到米量级),试验雷诺数较低( $10^4$ 量级)。类似的水洞很多,如美国空军研究实验室、澳大利亚航空研究实验室、德国宇航院的水洞等。

## (b) 水流体力学研究水洞

1941年,荷兰海事研究所建设了大型空化水洞,主要用于船舶螺旋桨空化和推进研究(见图2)。水洞压力可调(小于

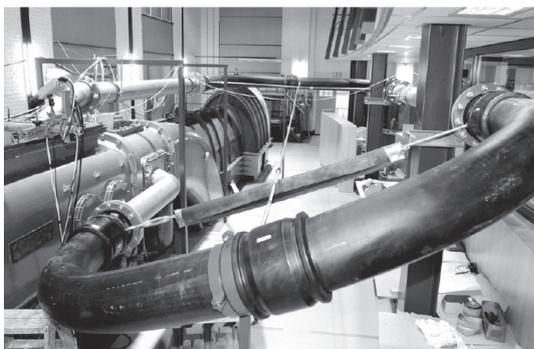


图2 荷兰海事研究所空化水洞  
Fig.2 Cavitation tunnel of Netherlands Maritime Institute

180kPa),空化数 $\sigma_n=0.2^{-6}$ ,最大可试验螺旋桨直径0.4m。可用于船舶螺旋桨推进、空化、噪声等试验研究。

瑞士水力机械实验室建设了用于水力机械研究的水洞,主要用于水轮机、水泵、船舶螺旋桨等空化和推进研究(见图3)。试验速度可达50m/s,压力可调(小于160kPa),雷诺数可达 $10^7$ 量级,湍流度小于0.3%。

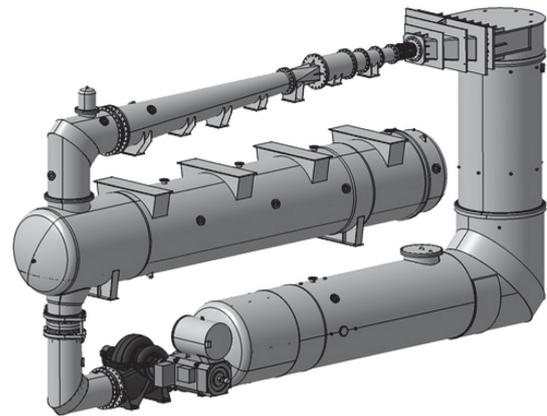


图3 瑞士水力机械实验室高速水洞  
Fig.3 High speed water tunnel of Swiss Hydraulic Machinery Laboratory

用于船舶和水力机械流体力学研究的水洞构造复杂,通常试验段尺寸较大,试验速度较高,试验压力可调,试验雷诺数高,具有水中空气重溶控制系统。类似的水洞还有美国水面作战中心36英寸水洞、大卫·泰勒变压水洞等。

## (2) 拖曳水槽或水池

俄罗斯TsAGI水槽试验设备<sup>[8]</sup>长202m,水面宽12m,深6m,试验段长84m,试验速度为12m/s。水浪模拟:高30~200mm,波浪长3~7.5m。水槽底部和墙壁是浇筑的钢筋混凝土结构,装备有高精度的轨道。波浪发生器是震荡板式,拖曳车为轻质金属结构,有4个电机驱动的车轮,轨道运行速度16m/s。

该设备可以进行以下试验:

- (a) 在静止的或有波浪的水面进行拖曳试验;
- (b) 通过模型试验,确定水上飞机、水陆两用飞机、翼型船的水动力特性;
- (c) 飞机和直升机模型水上迫降试验;
- (d) 研究水下运动物体以及相对尺寸较小物体的各种流体特性。

该设备于1930年开始运行,并分别于1930年和1967年进行了改造,如图4所示。利用该设备可以进行水面舰船、潜艇、水下推进装置、各种推进剂的特性、航海能力和流体力学领域的研究;可以研究物体穿越水面、水面或水下物体运动

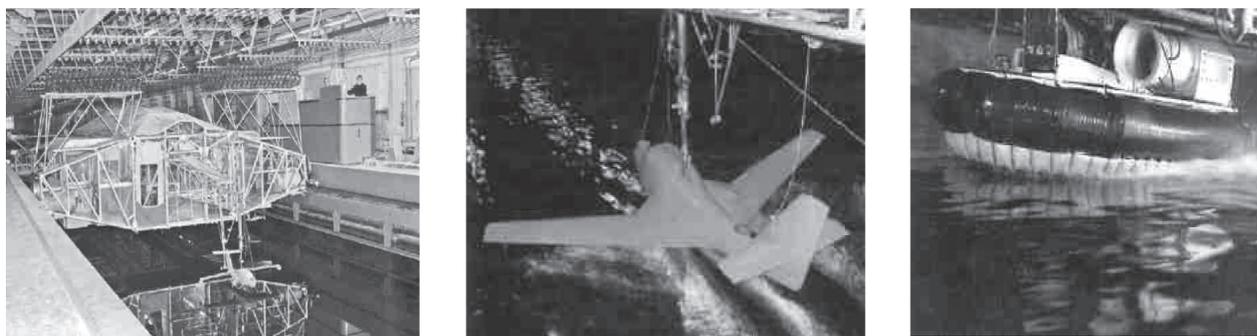


图4 俄罗斯TsAGI水槽试验设备

Fig.4 TsAGI basin test equipment in Russian



图5 湖泊水上漂浮弹射装置

Fig.5 Lake floating catapult

的流体动力特性。该设备长期用于水陆两用飞机、高速海轮、特种海军武器和航空航天工程项目。

美国、澳大利亚、德国等都建设有类似的水槽或水池试验装置。

### (3) 湖泊水上漂浮弹射装置

俄罗斯TsAGI湖泊水上漂浮弹射装置<sup>[8]</sup>是一种湖泊水面上模型发射试验装置,用动力相似的缩尺模型进行自由运动试验,如图5所示。该弹射装置是“Π”型框架结构,安装在两个圆柱浮筒上。模型通过气动作动器加速。弹射速度10~30m/s,模型初始弹射高度0~0.5m,最大弹射重量80kg,模型翼展3.8m,最大长度4.0m,最大高度1.0m。

该弹射装置可以进行以下试验:

- (a) 研究飞机和航天返回舱紧急迫降水面;
- (b) 研究翼型船、水上飞机和水陆两用飞机的飞行以及水面降落。

## 5 结束语

对国外主要水洞设备的形式、特点进行了归纳总结,得出以下几点结论:

(1)水洞、水槽或水池、水上漂浮弹射装置是水流体力学研究的3种试验设备。同空气动力学研究类似,水洞、数值计算和真实水试(包括缩尺模型)是水流体力学研究的3种手段。

(2)水洞是一种水流体力学研究设备,也是一种空气动力学基础研究设备,主要用于舰船、水中兵器、航空航天飞行器试验研究。在空气动力学研究方面,主要用于雷诺数不敏感的飞行器复杂流场流动显示,也可进行动态试验和模型测力试验。

(3)用于水流体力学研究的水洞与用于空气动力学研究的水洞相比,在结构、性能参数等方面存在很大差异,因此,水洞的主要用途或建设目的决定水洞的结构形式和性能设计参数。

(4)水洞在结构布局上有直流和回流式、重力式和非重力式,试验段有立式和水平式、自由水面和无自由水面式、开口和闭口式等。

(5)水洞主要性能衡量指标包括:能量比、初生空化数、试验段流速/流速分布、湍流度、噪声,其他性能指标还有气密性、温度/压力/含气量调节、观察窗透明度、水质等。 **IAST**

### 参考文献

- [1] Brent R C, John D F. Water tunnel flow visualization study of a 4.4% scale X-31 forebody[R]. NASA-TM-104276, 1994.
- [2] Adam Jaroszewicz. Estimation of MAV unsteady aerodynamic parameters from dynamic water tunnel testing[J]. AIAA-2011-1162, 2011.
- [3] Lincoln P E. Static liquefaction of sandy soil: an experimental investigation into the feasibility of measuring static and dynamic aerodynamic derivatives in the DSTO water tunnel[J]. DSTO-TR-2600, 2010.
- [5] John H D F. NASA dryden flow visualization facility[Z]. NASA-TM-4631, 1995.
- [6] Martin J D. Measurement of steady and unsteady duct loads for propeller 4381 at crashback conditions in the 36" water tunnel[Z]. NSWCCD-50-TR-2010/051, 2010.
- [7] Dariusz R. Neural model of UAV unsteady aerodynamic characteristics from water tunnel tests data[J]. AIAA-2013-4981, 2013.
- [8] TsAGI. TsAGI 95[EB/OL]. [Http://www.tsagi.ru](http://www.tsagi.ru).

### 作者简介

战培国(1963— ) 男, 硕士, 高级工程师。主要研究方向: 空气动力学。

Tel: 0816-2463158

E-mail: zpg63@163.com

## Review of Foreign Water Tunnel Test Equipment Construction Research

ZHAN Peiguo\*, WANG Pei

*Calculating Aerodynamic Research Institute, China Aerodynamics Research and Development Center, Mianyang 621000, China*

**Abstract:** Water tunnel is the major test equipment of hydromechanics research, and the auxiliary equipment of aerodynamic basic research. Based on the overview of air and water physical properties, summarized the main forms and characteristics of different utility tunnel; and introduced the three kinds of typical water flow test equipment. Intended to provide reference for the development of domestic water flow test equipments and aerodynamic basic research equipments.

**Key Words:** water tunnel; towing tank; water test; hydromechanics; aerodynamic

Received: 2015-06-18; Accepted: 2015-07-26

\*Corresponding author. Tel.: 0816-2463158 E-mail: zpg63@163.com