



中航工业首席专家
技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目
中航工业科技与信息化部组织编写

褚林塘 著

水上飞机水动力设计

SEAPLANE
HYDRODYNAMIC DESIGN

航空工业出版社

中航工业首席专家技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

水上飞机水动力设计

褚林塘 著

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书详细阐述了水上飞机的基本概念和特点,分析了水上飞机水动力设计理论;重点论述了水上飞机水动力性能和水动布局及外形设计;全面探讨了水上飞机水动力性能试验分析方法;最后,对水动力设计新技术和水上飞机未来发展进行了展望。

本书可供从事水上飞机研究、设计、试验的科技人员参考和使用,亦可以作为高等院校相关专业教师、研究生和在校大学生的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

水上飞机水动力设计 / 褚林塘著. -- 北京: 航空工业出版社, 2014. 11

(中航工业首席专家技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 5165 - 0411 - 6

I. ①水… II. ①褚… III. ①水上飞机—水动力学
IV. ①V271.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 256636 号

水上飞机水动力设计

Shuishang Feiji Shuidongli Sheji

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑 2 号院 100012)

发行部电话: 010 - 84936597 010 - 84936343

北京世汉凌云印刷有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2014 年 11 月第 1 版

2014 年 11 月第 1 次印刷

开本: 787 × 1092 1/16 印张: 16.75 插页: 8 字数: 444 千字

印数: 1—2100

定价: 158.00 元

总 序

航空工业被誉为“现代工业之花”，是国家战略性高技术产业，同时也是技术密集、知识密集、人才密集的行业。中国是世界航空产业格局中的后来者，而中航工业作为支撑中国航空工业发展的核心力量，履行国家使命，必须大力推进自主创新，必须在科技创新和知识创新上有所作为。

从2009年开始，中航工业按照航空技术体系，在科研一线技术人才中陆续遴选出近百位集团公司级“首席技术专家”。此举既是集团公司对这些技术人才技术水平和能力的肯定，也意味着集团公司赋予了他们更大的责任和使命。我们希望这些技术专家在今后的工作中，要继续发挥科研技术带头人的作用，更加注重学习和创新，不断攀登航空科技新的高峰；要坚持潜心科研，踏实工作，不断推动航空科技进步；要带队伍、育人才，打造高水平的科研队伍，努力培养更多的高层次专业技术人才，为中航工业的发展做出更大的贡献。

21世纪企业的成功，越来越依赖于企业所拥有知识的质量，利用企业所拥有的知识为企业创造竞争优势和持续竞争优势，这对企业来说始终是一个挑战。正因如此，“知识管理”在航空工业等高科技产业领域得以快速推广和应用。依照这个思路，将首席技术专家们所积淀和升华出来的显性或隐性知识纳入知识管理体系，是进一步发挥其人才效益的重要方式，也是快速提升中航工业自主创新能力的的重要途径。

知识管理理论的核心要义，就是把知识作为一种重要资产来进行管理，正如知识管理的创始人斯威比所说：“知识资本是企业的一种以相对无限的知识为基础的无形资产，是企业核心竞争能力的源泉。”如果专家们把其掌握的各类显性或隐性知识，用书面文字的形式呈现出来，就相当于构建了一个公共资料库，提供了一个交流平台，可以让更多的人从中受益——这就是出版这套“中航工业首席专家技术丛书”的初衷。

集团公司的这近百位“首席技术专家”，基本覆盖了航空工业的所有专业。每位专家撰写一部专著，集合起来，就相当于一个航空工业的“四库全书”，很有意义。在此，我要特别感谢这些专家们，他们在繁重的科研生产任务中，不辞辛劳地撰写出了自己的专著，无私地将自己的宝贵经验呈现给大家，担当起了传承技术、传承历史的责任。

相信这套丛书的出版，会使更多的航空科技工作者从中获益，也希望在一定程度上能助力中航工业的自主创新，对我国航空工业的科技进步产生积极影响。

林左鸣

中国航空工业集团公司董事长

前 言

水上飞机是利用江、河、湖、海等水面作为起飞和降落场地的一种水面飞行器（包括水上飞机、水陆两栖飞机、地效飞机），它具有机动性和可达性好、安全性高、易于大型化等显著特点。

水上飞机的研发和应用已有 100 多年的历史，它是人类社会最早使用的飞行器之一。随着现代航空动力、材料、电子技术的发展和水上飞机高适海性气动布局、水动布局设计等多项关键技术的不断突破，现代水上飞机的性能指标得到大大提高，其应用领域也大为拓展。21 世纪是海洋的世纪，海洋资源开发、海上交通运输、海上应急救援以及海上安全保卫等任务的迫切需求，又赋予了水上飞机新的使用价值；另外，现代水上飞机在森林与城市灭火、客货运输、环境监测等领域也都具有广阔的应用空间。

中国特种飞行器研究所（简称特飞所）是我国唯一从事水面飞行器研发的主机研究所，建所 50 多年来，已先后研制出多种型号的水上飞机、水陆两栖飞机和地效飞机产品并投入使用，填补了我国在水面飞行器研制领域的多项技术空白，在水面飞行器型号研制和水动力设计方面也积累了丰富的工程实践经验。

作者自参加工作以来，主要研究方向为水上飞机、水陆两栖飞机、地效飞机、水面舰艇、高性能船舶、潜艇、水中兵器等运载类平台的水动力设计与试验研究。先后参加或主持了 A2C 超轻型水上飞机、DX100 地效飞机、“海鸥” 300 轻型水陆两栖飞机以及 TA600 大型灭火/水上救援水陆两栖飞机等型号的水动布局与设计、水动力性能计算与分析以及水动力试验与试飞等工作。作者在多年的专业技术工作经历以及与国内外同行交流合作中，感受比较深刻的一点就是苦于没有一本类似飞机设计手册一样的专业书籍，能够较全面地介绍水上飞机水动力设计方面的知识并指导工程技术人员开展相关技术工作。鉴于此，作者多年来就一直在期盼能够编写一本水上飞机水动力设计方面的专业书籍，以便能供从事水上飞机研究和设计的人员借鉴和参考。2011 年，中国航空工业集团公司对所聘任的首席技术专家提出了编写技术专著的要求，作者作为集团公司聘任的水动力设计专业领域的首席技术专家，充分认识到编撰水上飞机水动力设计技术专著的时机已经成熟，同时开展并完成好技术专著的编写工作也是一份沉甸甸的责任，理所当然应顺势而为，抓紧实施。

本书共分为 8 章，其主要内容包括水上飞机概述、水上飞机水动力学设计基础、水动力性能、水动布局及外形设计、模型水动力试验、水动力性能飞行试验以及水动力设计新技术和未来水上飞机发展等。本书理论联系实际，较为全面、系统地介绍了水上飞机水动力设计的相关技术问题，有较强的工程实用价值。本书可供有关科研院所和企业的工程技术人员参照使用，并可作为高等院校师生的参考用书和航空爱好者的科普书。

在本书的编写过程中，得到特飞所科技委、水动力研究中心以及多年来从事水上飞机设计的老一辈技术专家的大力支持，本人特致以衷心的感谢。

编撰出版《水上飞机水动力设计》一书在我国航空界还是首次，由于缺乏经验，加上条件和时间有限，书中难免存在缺点和不足之处，热忱欢迎广大读者和国内学者、专家不吝赐教。

褚林塘

2013年9月21日

符 号 表

W_0	重力
CG	水上飞机重心
B	浮力, 船身水下表面承受水静压力的合力
CB	飞机水上浮心
ρ_w	水密度
D_a	飞机排水量
θ	飞机横倾角
φ	纵倾角
x_{CB}	浮心纵坐标
y_{CB}	浮心横坐标
z_{CB}	浮心竖坐标
x_{CG}	重心纵坐标
y_{CG}	重心横坐标
z_{CG}	重心竖坐标
z_a	平均吃水
A_w	基准面以上高度为 Δz 处薄层所在高度的水线面面积
l_{bf}	前船体长, 自艏柱前 endpoint 至主断阶在下构造水平线上的投影距离
l_{ba}	后船体长, 自主断阶至艏断阶在下构造水平线上的投影距离
M_{xOy}	排水体积对平面 xOy 的静矩
M_{yOz}	排水体积对平面 yOz 的静矩
M_{xOz}	排水体积对平面 xOz 的静矩
M_{Oy}	水线面面积 A_w 对 Oy 轴的静矩
x_F	漂心纵坐标
δ_z	两等分水线之间的等分距离
δ_L	站距
z_{sc}	横截面形心竖坐标
A_S	横截面在对应吃水下的面积
θ_o	浮筒的出水角
θ_i	浮筒的入水角
h_0	水上飞机无横倾时, 浮筒断阶龙骨点到静水面距离
z_{af}	艏吃水
z_{aa}	艉吃水
b	浮筒纵中截面到机身纵中截面的距离

h_1	浮筒最低点到最高点的垂向距离
h_w	飞机无横倾时, 翼尖到静水面的距离
θ_1	翼尖入水时的极限横倾角
CS_{La}	飞机水上横稳心
ρ_0	初稳心半径
I_x	水线面相对于 x 轴 (纵轴) 的惯性矩
h_{La}	横稳心高, 横稳心与重心之间垂向距离
a	飞机重心与浮心的垂直高度
M_{La}	全机横向恢复力矩
M_p	浮筒提供的横向恢复力矩
M_{un}	船身提供的横倾力矩
M_o	螺旋桨有效反作用力矩
δ_1	入水浮筒的重量排水量
D_{hl}	水上飞机船身的排水量
N_B	发动机功率
n	螺旋桨转速
M_w	侧风倾覆力矩
θ_c	极限静横倾角
v_c	极限均匀侧风风速
θ_d	极限动横倾角
v_d	极限突风 (又称阵风) 风速
Ω_w	侧风倾覆力矩的功
Ω_{La}	全机横向恢复力矩的功
v_w	侧风风速
ρ_a	空气密度
S_w	机翼面积
M_{Lo}	全机纵向恢复力矩
μ_V	体积渗透率
μ_a	面积渗透率
V_r	舱室实际容积
V	舱室理论容积
$\delta_{z_{av}}$	进水舱进水后的平均吃水增量
h_{La1}	舱室进水后的新横稳心高
h_{Lo1}	舱室进水后的新纵稳心高
$\delta_{z_{af}}$	舱室进水后纵倾引起的艏吃水变化
$\delta_{z_{aa}}$	舱室进水后纵倾引起的艉吃水变化
z'_{af}	舱室进水后的艏吃水
z'_{aa}	舱室进水后的艉吃水
V_1	进水舱体积

A_{wl}	损失水线面积
δ_{xCB}	破舱进水后浮心纵向位置变化
δ_{yCB}	破舱进水后浮心横向位置变化
δ_{zCB}	破舱进水后浮心垂向位置变化
$\delta_{\rho_{La}}$	破舱进水后横稳心半径变化值
$\delta_{\rho_{Lo}}$	破舱进水后纵稳心半径变化值
$\delta_{h_{La}}$	破舱进水后横稳心高的变化值
$\delta_{h_{Lo}}$	破舱进水后纵稳心高的变化值
CB'	破舱后的浮心
V'_{pl}	破舱后的排水体积
CG'	V'_{pl} 的重心
L_i	破舱的中点纵坐标
l_0	可浸长度
v_{ws}	水上飞机水面滑行速度
l_{we}	水上飞机机身浸湿长度
p	压力
δ	喷溅厚度
C_f	摩擦阻力系数
C_L	动载荷因数, 又称升力系数
C_M	力矩系数
ε	滑行系数, 又称升阻比
α_y	迎角
λ_1	浸湿长宽比
B_{wf}	滑行面浸湿宽度
L_D	二维滑行平板的升力
$R_{f(x)}$	摩擦力在水平方向的分力
L_f	摩擦力在铅垂方向的分力
S_p	平板的浸湿面积
D_p	滑行平板重力
R_t	滑行总阻力
R_f	摩擦阻力
Fr	弗劳德数
B_{hull}	滑行船体宽度
L_j	总静浮力
R_x	压差阻力
R_{sp}	喷溅阻力
R_w	兴波阻力
Fr_B	宽度弗劳德数

Fr_V	体积弗劳德数
∇	体积排水量
$B_{\oplus}$	船体中部折角线宽度
B_T	船体艉板处折角线宽度
M_t	流体动力对尾板的力矩
ζ	流体动力作用点至尾板的距离
β	斜升角
α_{opt}	最佳纵倾角
L_f	断阶前支撑面的升力
l_f	断阶前支撑面的浸湿长度
B_f	断阶前支撑面的宽度
L_a	断阶后支撑面的升力
l_a	断阶后支撑面的浸湿长度
B_a	断阶后支撑面的宽度
α_B	几何迎角
α_0	零升力角
α_T	流体动力迎角
f	翼型拱度或弯度
c	机翼弦长 (简称翼弦)
Re	雷诺数
α_{cr}	失速迎角
C_{Lmax}	最大升力系数
$\Delta\alpha$	下洗角
$C_{L\infty}$	无限翼展升力系数
L	有限翼展升力
L_{∞}	无限翼展升力
R_{∞}	无限翼展阻力
R_e	有限翼展阻力
α_k	有效迎角
C_i	诱导阻力系数
h_e	端板高度
l_z	机翼展长 (简称翼展)
Fr_h	浸深弗劳德数
$\bar{h}$	水翼相对浸深
h	浸深
Re_c	以弦长 c 为特征长度的雷诺数
Fr_c	以弦长 c 为特征长度的弗劳德数
C_p	压力系数

p_v	该温度下的饱和蒸汽压力
σ	空泡数
C_{pmax}	最大减压系数
v_k	空泡起始速度
U_{10}	海平面以上 10m 处风速
B_w	蒲福风级
U_z	海平面以上 z m 处风速
U_G	瞬间风速
G	突风率
U	平均风速
t_1	评价时间
Z_0	粗糙长度
$H_{3\%}$	3% 波高保证率
$H_{1/3}$	1/3 有义波高
S	船体浸湿面积
l_b	船体长度
ν_w	水的运动黏度
g	重力加速度
t	水温
ΔC_f	由表面粗糙度而引起的摩擦阻力修正系数
B_{st}	船体主断阶宽度, 主断阶处横截面舳线处的宽度
k'	船身式机身空气阻力系数与流线型机身空气阻力系数之比
v_{ga}	飞机起飞离水速度
R_s	实机水阻力
R_{fs}	实机摩擦阻力
R_{rs}	实机剩余阻力
λ	缩尺比
R_m	模型水阻力
R_{fm}	模型摩擦阻力
α	二维滑行平板迎角
l_m	平板浸湿长度
l	二维平板长度
l_1	二维平板的驻点线至平板尾缘的距离
l_2	二维平板的驻点线至平板前缘的距离
γ	喷溅喷射方向与平板之间的夹角
v_n	垂直于驻点线的速度分量
v_s	沿着驻点线的速度分量
α'	三维船体有效纵倾角
τ	须状喷溅方向与驻点线的夹角

K_f	前体喷溅系数
K_2	船体喷溅系数, 又称戴维森 (Davidson) 系数
Δ	飞机静载荷
C_Δ	静载荷因数
N_v	水动力矩的位置导数
$N_{\dot{v}}$	水动力矩的线加速度导数
N_{r_0}	水动力矩的旋转导数
$N_{\dot{r}_0}$	水动力矩的角加速度导数
$N_{\dot{\delta}_r}$	舵角控制导数
I_{zz}	船体绕 z 轴的质量惯性矩
v	横向速度
$\dot{v}$	横向加速度
r_0	回转角速度
$\dot{r}_0$	回转角加速度
N	水动力矩对 z 轴的回转力矩
β_1	水上飞机重心处的漂角
v_{CG}	水上飞机重心的瞬时速度
D	水上飞机的最小回转直径
A_R	水舵浸湿面积
D_T	战术直径
P	定常回转的枢心
T_1	应舵指数
K_1	回转性指数
R_0	水上飞机重心轨迹的瞬时曲率半径
P_1	单位舵角的艏向角变化
ζ_{an}	单元规则波的振幅
k_n	单元规则波波数
ω_n	单元规则波的圆频率
ε_n	单元规则波的相位
$S_\zeta(\omega)$	海浪谱密度函数
ω	圆频率
$S_{y\varphi}(\omega)$	飞机纵摇运动谱密度
$H_\varphi(\omega)$	纵摇运动频率响应函数
ζ_a	规则波幅值
y_a	试验模型运动幅值
ω_e	遭遇频率
m	附加质量
m_0	物体质量
v_0	物体入水速度

c	撞击面的半宽
i	水上飞机的惯性半径
χ	诱导系数
n_w	水面反作用载荷因数 (又称过载)
v_{S0}	襟翼打开在相应的着水位置, 不考虑滑流影响的水上飞机失速速度
W	水上飞机设计着水重量
K_a	船体站位的经验加权系数
p_k	龙骨上的压力
K_b	船体站位加权系数
v_{S1}	襟翼打开在相应的起飞位置, 水面设计起飞重量下的水上飞机失速速度
β_k	在龙骨处的斜升角
p_{ch}	舳处的压力
p_{sy}	对称压力
K_m	附连质量因子
A_0	最大加速度因子系数
v_{n0}	垂直于龙骨的速度分量
$S_{\Delta n}(\omega_e)$	实机的载荷因数 (又称过载) 增量功率谱密度函数
H_w	试验有义波高
Δn	试验过载增量
T_1	波浪的特征周期
v_b	波速
ϕ	飞机航向与波浪传播方向夹角
v_e	相对波速
N_c	零交频率
l_{WL}	水线长度
Y_a	机翼升力
v	船体速度
R	水阻力
v_a	气流速度
M	水动力矩
Y_w	水动升力
v_S	失速速度
l_{b2}	船体有效滑行长度
C	主断阶高度计算公式常数
α_{ak}	后体龙骨角
h_{st}	断阶高度
l_{ba}/B_{st}	后体长宽比
C_{RS}	断阶的水阻力系数
C_{L0}	滑行平板升力系数

$C_{L\beta}$	V形滑行面升力系数
l_c	平均浸湿长度
B_p	平板宽度
l_{ba}/l_{bf}	后体长度与前体长度之比
R_p	滑行阻力
$\delta_{\min}$	浮筒最小排水量
W_{TO}	静水水面最大起飞重量
L_{fl}	两浮筒纵截面距离
M_F	浮筒恢复力矩
S_r	设计的水舵面积
l_0	水舵力臂
h_r	水舵高度
l_r	水舵宽度
t_r	水舵厚度
k	平衡面积比
p_0	截面未有扰动前流体的静压力
M_u	卸载重量
M_m	模型重量
v_m	试验速度
v_{TO}	模型离水速度

目 录

第1章 概述	(1)
1.1 水上飞机的特点	(1)
1.1.1 水上飞机及其分类	(1)
1.1.2 水上飞机的主要设计特点	(1)
1.1.3 水上飞机的使用环境和使用要求	(4)
1.2 水上飞机的发展历史	(5)
1.2.1 早期的水上飞机	(5)
1.2.2 第二次世界大战时期的水上飞机	(6)
1.2.3 现代水上飞机	(6)
1.3 水上飞机的主要优点和用途	(8)
1.3.1 水上飞机的主要优点	(8)
1.3.2 水上飞机的用途	(8)
第2章 水动力设计基础	(10)
2.1 水上飞机流体静力学	(10)
2.1.1 浮性	(10)
2.1.2 稳性	(19)
2.1.3 抗沉性	(26)
2.2 水上飞机流体动力学	(32)
2.2.1 滑行理论	(32)
2.2.2 水翼理论	(52)
2.3 气象水文条件及适海性	(70)
2.3.1 海水	(70)
2.3.2 风与浪	(70)
2.3.3 浪级与海况	(73)
2.3.4 船舶耐波性评估标准	(77)
2.3.5 航行舒适性限制	(78)
第3章 水动力性能	(80)
3.1 阻力特性	(80)
3.1.1 水上飞机阻力类型	(80)
3.1.2 起飞和降落过程中阻力的变化	(84)
3.1.3 船体主要参数对阻力的影响	(85)
3.1.4 模型水阻力的实机换算	(88)
3.1.5 水上飞机阻力性能评判方法	(90)
3.2 纵向运动稳定性	(90)

3.2.1	水上飞机起降纵向运动稳定性设计要求	(91)
3.2.2	水上飞机起降纵向运动稳定性评判方法	(92)
3.2.3	水上飞机模型试验纵向运动稳定性判定准则	(94)
3.2.4	船体参数对起降纵向运动稳定性的影响	(97)
3.3	操纵性	(99)
3.3.1	操纵性概述	(99)
3.3.2	航向操纵性	(100)
3.3.3	操纵性衡准	(104)
3.4	喷溅特性	(107)
3.4.1	喷溅产生的机理	(108)
3.4.2	喷溅发展及其危害	(111)
3.4.3	影响喷溅的因素	(112)
3.4.4	抑制喷溅措施	(113)
3.4.5	喷溅性能的评判方法	(115)
3.5	耐波性	(117)
3.5.1	波浪概述	(117)
3.5.2	水上飞机在波浪上的运动	(119)
3.5.3	波浪上的运动统计分析	(120)
3.5.4	水上飞机在波浪上运动特性预报	(123)
3.5.5	船体参数对飞机在波浪上运动的影响	(126)
3.6	水载荷	(127)
3.6.1	水载荷的类型及其对飞机结构强度的影响	(127)
3.6.2	水载荷理论分析	(127)
3.6.3	船体参数对水载荷的影响	(133)
3.6.4	水载荷谱的编制方法	(138)
3.6.5	降低水载荷的方法	(141)
第4章	水动布局及外形设计	(145)
4.1	概述	(145)
4.2	水动布局型式与设计	(145)
4.2.1	水动布局型式	(145)
4.2.2	水动布局型式的选择	(146)
4.3	船体设计	(147)
4.3.1	船体设计程序概述	(147)
4.3.2	水上飞机船体概述	(149)
4.3.3	船体参数选择	(150)
4.4	浮筒设计	(169)
4.4.1	浮筒体积的确定方法	(170)
4.4.2	浮筒参数的选择	(172)
4.5	其他水动力设计	(173)