

魚雷操縱性

Torpedo Maneuverability

李天德 編著

國防大學出版社

00001328

TJ630.1

01

鱼雷操纵性 Torpedo Manoeuvrability

李天森 编著

HK40/21



国防工业出版社



C0471606

图书在版编目(CIP)数据

鱼雷操纵性/李天森编著. - 北京:国防工业出版社,
1999.7

ISBN 7-118-02066-4

I. 鱼… II. 李… III. 鱼雷-操纵性 IV. TJ63

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 01331 号

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号)

(邮政编码 100044)

三河腾飞胶印厂印刷

新华书店经售

开本 850×1168 1/32 印张 8% 213 千字

1999 年 7 月第 1 版 1999 年 7 月北京第 1 次印刷

印数:1—1000 册 定价:17.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

致 读 者

本书由国防科技图书出版基金资助出版。

国防科技图书出版工作是国防科技事业的一个重要方面。优秀的国防科技图书既是国防科技成果的一部分，又是国防科技水平的重要标志。为了促进国防科技事业的发展，加强社会主义物质文明和精神文明建设，培养优秀科技人才，确保国防科技优秀图书的出版，国防科工委于1988年初决定每年拨出专款，设立国防科技图书出版基金，成立评审委员会，扶持、审定出版国防科技优秀图书。

国防科技图书出版基金资助的对象是：

1. 学术水平高，内容有创见，在学科上居领先地位的基础科学理论图书；在工程技术理论方面有突破的应用科学专著。
2. 学术思想新颖，内容具体、实用，对国防科技发展具有较大推动作用的专著；密切结合科技现代化和国防现代化需要的高新技术内容的专著。
3. 有重要发展前景和有重大开拓使用价值，密切结合科技现代化和国防现代化需要的新工艺、新材料内容的科技图书。
4. 填补目前我国科技领域空白的薄弱学科和边缘学科的科技图书。
5. 特别有价值的科技论文集、译著等。

国防科技图书出版基金评审委员会在国防科工委的领导下开展工作，负责掌握出版基金的使用方向，评审受理的图书选题，决定资助的图书选题和资助金额，以及决定中断或取消资助等。经评审给予资助的图书，由国防工业出版社列选出版。

国防科技事业已经取得了举世瞩目的成就。国防科技图书承

担着记载和弘扬这些成就，积累和传播科技知识的使命。在改革开放的新形势下，国防科工委率先设立出版基金，扶持出版科技图书，这是一项具有深远意义的创举。此举势必促使国防科技图书的出版随着国防科技事业的发展更加兴旺。

设立出版基金是一件新生事物，是对出版工作的一项改革。因而，评审工作需要不断地摸索、认真地总结和及时地改进，这样，才能使有限的基金发挥出巨大的效能。评审工作更需要国防科技工业战线广大科技工作者、专家、教授，以及社会各界朋友的热情支持。

让我们携起手来，为祖国昌盛、科技腾飞、出版繁荣而共同奋斗！

国防科技图书出版基金
评审委员会

国防科技图书出版基金 第三届评审委员会组成人员

名誉主任委员 怀国模
主任委员 黄 宁
副主任委员 殷鹤龄 高景德 陈芳允 曾 铎
秘 书 长 崔士义
委 员 于景元 王小谟 尤子平 冯允成
(以姓氏笔划为序)
刘 仁 朱森元 朵英贤 宋家树
杨星豪 吴有生 何庆芝 何国伟
何新贵 张立同 张汝果 张均武
张涵信 陈火旺 范学虹 柯有安
侯正明 英梧生 崔尔杰

前 言

自从 1868 年第一条鱼雷问世以来，鱼雷作为海军的重要武器已有整整 130 年的发展史。鱼雷力学也已发展成为一个内容繁多的庞大家族。鱼雷操纵性作为鱼雷力学的一个独立分支，随着现代高速泵喷射鱼雷的研制，也越来越被人们所重视，因为鱼雷操纵性是鱼雷总体性能的主要组成部分，它与鱼雷能否有效地实施对敌舰船的攻击密切相关。

鱼雷操纵性是研究鱼雷借助操舵机构改变或保持运动姿态、航向能力的一门科学。它的主要研究内容是鱼雷的运动和鱼雷的流体动力，并将二者紧密结合在一起。

本书共分八章，其中前四章着重建立鱼雷流体动力的非线性数学模型和鱼雷空间运动方程，鱼雷操纵运动的标准和判别，以及鱼雷空间运动弹道性能预报方法；后四章着重论述鱼雷操纵性设计准则，鱼雷流体动力的试验方法以及工程估算方法。

本书是一本内容新颖、实用性强的工具书。可供鱼雷总体性能研究人员、设计人员使用，也可作为鱼雷制造厂、海军有关技术人员，高等院校本科生、研究生和教师的参考资料。

本书在编写过程中承蒙海军论证中心梁海军，船舶总公司七院七〇五所于文河，七〇二所吴有生、沈泓莘、闵宪裕、孙张群、蔡大明、颜开等有关专家的热情帮助和大力支持，周毅硕士帮助编制了鱼雷空间运动预报程序，在此特致深切谢意！

由于作者水平有限，错误和不当之处在所难免，谨请读者批评指正。

编著者

内 容 简 介

本书共分八章,系统地介绍了有关鱼雷操纵性的基本知识、基本理论和基本方法。在理论方面着重介绍了鱼雷空间运动的非线性数学模型,以及鱼雷操纵性标准、判别和预报方法。在实用方面,着重介绍了鱼雷操纵面的设计准则、流体动力试验和工程估算方法。

本书可供鱼雷总体性能研究人员、设计人员使用,也可作为鱼雷制造厂、海军有关技术人员,高等院校本科生、研究生和教师的参考资料。

This book is divided into eight chapters. It mainly introduces the basic knowledge, theories and methods about torpedo manoeuvrability. In theory, it mainly establishes nonlinear mathematical model on spatial motion, manoeuvrability criteria and prediction methods for torpedo. In practice use, it mainly introduces the design codes for the control surfaces, model test and engineering estimating methods about torpedo hydrodynamics.

This book is useful for the engineers engaged in research and design of torpedo manoeuvring performance. It can also be used as a reference book for the technicians from torpedo manufacturers, navy, the lecturers and students of institutes and universities.

目 录

主要符号表	1
绪论	6
第一章 鱼雷空间运动方程	9
§ 1-1 坐标系与转换矩阵	9
§ 1-2 运动学方程	13
§ 1-3 动力学方程	15
§ 1-4 空间运动受力分析	19
§ 1-5 空间运动方程的一般表达式	27
§ 1-6 空间运动方程的简化式	31
第二章 纵向运动的操纵性	34
§ 2-1 平衡冲角与平衡舵角	34
§ 2-2 纵向运动的稳定性	36
§ 2-3 纵向扰动方程及拉氏变换	40
§ 2-4 纵向运动参数的传递函数与过渡函数	45
§ 2-5 纵向运动参数的频率特性	50
§ 2-6 纵向操纵性计算及算例	53
第三章 横向-横滚运动的操纵性	63
§ 3-1 水平面定常运动	63
§ 3-2 横向-横滚运动的扰动方程及拉氏变换	66
§ 3-3 横向-横滚运动参数的传递函数	70
§ 3-4 横向-横滚运动参数的过渡函数	72
§ 3-5 横向-横滚运动参数的频率特性	78
§ 3-6 横向-横滚操纵性计算及算例	81

第四章 鱼雷空间运动预报	92
§ 4-1 空间运动方程的求解	92
§ 4-2 水平面运动预报	96
§ 4-3 垂直面运动预报	108
§ 4-4 空间定常螺旋运动预报	117
第五章 操纵性设计	119
§ 5-1 操纵性设计总则	119
§ 5-2 操纵性设计程序	121
§ 5-3 对转桨鱼雷的操纵面布局	123
§ 5-4 泵喷射鱼雷的操纵面布局	128
第六章 流体动力的试验测定	143
§ 6-1 相似准则	143
§ 6-2 试验设计	148
§ 6-3 位置力的试验测定	156
§ 6-4 旋转力及其与位置力交叉耦合导数的试验测定	176
第七章 粘性类流体动力的估算	187
§ 7-1 鳍舵剖面的流体动力特性	187
§ 7-2 鳍舵的自由流特性	194
§ 7-3 鱼雷鳍舵的流体动力特性	208
§ 7-4 雷体的流体动力估算	221
§ 7-5 对转桨鱼雷的流体动力估算	228
§ 7-6 泵喷射鱼雷的流体动力估算	231
第八章 附加质量的测定与估算	242
§ 8-1 附加质量的测定	242
§ 8-2 附加质量的估算	245

Contents

List of Symbols	1
Introduction	6
Chapter 1 Torpedo Spatial Motion Equation	9
§ 1-1 Coordinate System and Transform Matrix	9
§ 1-2 The Kinematic Equations	13
§ 1-3 The Dynamical Equations	15
§ 1-4 Force Analyses of Torpedo in the Spatial Motion	19
§ 1-5 General Formulae of the Spatial Motion Equations	27
§ 1-6 Simplified Formulae of the Spatial Motion Equations	31
Chapter 2 Manoeuvrability of the Longitudinal Motion	34
§ 2-1 Balance Attack Angle and Balance Rudder Angle	34
§ 2-2 Stability of the Longitudinal Motion	36
§ 2-3 The Longitudinal Disturbance Equation and Laplace Transforms	40
§ 2-4 Transfer Functions and Transition Functions of the Longitudinal Motion Parameters	45
§ 2-5 Frequency Characteristics of the Longitudinal Motion Parameters	50
§ 2-6 Longitudinal Manoeuvrability Calculation and Some Examples	53

Chapter 3	Manoeuvrability of the Transverse-Roll Motion	63
§ 3-1	Equations of Steady Motion in the Horizontal Plane	63
§ 3-2	Disturbance Equations of the Transverse-Roll Motion and Laplace Transforms	66
§ 3-3	Transfer Functions of the Transverse-Roll Motion Parameters	70
§ 3-4	Transition Functions of the Transverse-Roll Motion Parameters	72
§ 3-5	Frequency Characteristics of the Transverse-Roll Motion Parameters	78
§ 3-6	Transverse-Roll Manoeuvrability Calculation and Some Examples	81
Chapter 4	Torpedo Spatial Motion Prediction	92
§ 4-1	Solution of the Spatial Motion Equations	92
§ 4-2	Prediction of the Motion in the Horizontal Plane	96
§ 4-3	Prediction of the Motion in the Vertical Plane	108
§ 4-4	Prediction of the Spatial Spiral Motion	117
Chapter 5	Manoeuvrability Design	119
§ 5-1	Manoeuvrability Design Principle	119
§ 5-2	Manoeuvrability Design Procedure	121
§ 5-3	Control Surface Layout of Torpedo with Counterrotating Propellers	123
§ 5-4	Control Surface Layout of Torpedo with Pumpjet Propulsor	128
Chapter 6	Experimental Measurement of the Hydrodynamic Forces	143
§ 6-1	Similarity Criteria	143

§ 6-2	Experiment Design	148
§ 6-3	Measurement of the Position Forces	156
§ 6-4	Measurement of the Rotating Forces and Their Cross Coupling with Those of Position Forces	176
Chapter 7	Estimation of Viscous Hydrodynamic Forces	187
§ 7-1	Hydrodynamic Characteristics of the Fin-Rudder Section	187
§ 7-2	Free Flow Characteristics of the Fin-Rudder	194
§ 7-3	Hydrodynamic Characteristics of the Fin-Rudder of Torpedo	208
§ 7-4	Estimation of Torpedo Body Hydrodynamic Forces	221
§ 7-5	Estimation of Hydrodynamic Characteristics of Torpedo with Counterrotating Propellers	228
§ 7-6	Estimation of Hydrodynamics of torpedo with Pumpjet Propulsor	231
Chapter 8	Measurement and Estimation of the Added Mass	242
§ 8-1	Measurement of the Added Mass	242
§ 8-2	Estimation of the Added Mass	245

主要符号表

- $EX_eY_eZ_e$ ——地面坐标系(静坐标系)
 $Bxyz$ ——雷体坐标系(动坐标系)
 i, j, k ——雷体坐标系三个坐标轴方向上的单位矢量
 X_e, Y_e, Z_e ——鱼雷浮心 B 相对地面系的坐标分量(m)
 φ, ψ, θ ——鱼雷相对地面系的三个欧拉角(rad)
 L ——雷长(m)
 S ——雷体最大横截面积(m²)
 D ——雷体直径(m)
 x_G, y_G, z_G ——鱼雷重心在雷体系中的坐标分量(m)
 $\overline{x_G}, \overline{y_G}, \overline{z_G}$ —— x_G, y_G, z_G 的无量纲量, $\overline{x_G} = x_G/L, \overline{y_G} = y_G/L, \overline{z_G} = z_G/L$
 V_T ——鱼雷浮心的速度矢量(m/s)
 u, v, w ——鱼雷浮心速度矢量在雷体系中的坐标分量(m/s)
 Ω ——鱼雷绕浮心的旋转角速度矢量(rad/s)
 p, q, r ——鱼雷旋转角速度在雷体系中的坐标分量(rad/s)
 p', q', r' ——角速度分量 p, q, r 的无量纲量, $p' = pL/V_T, q' = qL/V_T, r' = rL/V_T$
 m ——鱼雷质量(kg)
 μ ——质量 m 的无量纲量, $\mu = 2m/(\rho SL)$
 g ——重力加速度(m/s²)
 G ——鱼雷重力, $G = mg$ (N)
 \overline{G} —— G 的无量纲量, $\overline{G} = G/\left(\frac{1}{2}\rho V_T^2 S\right)$

B ——鱼雷的浮力(N)

ΔG ——鱼雷的负浮力, $\Delta G = G - B$ (N)

$\overline{\Delta G}$ —— ΔG 的无量纲量, $\overline{\Delta G} = \Delta G / G$

ρ ——介质密度(kg/m^3)

T ——推进器的推力(N)

F ——作用在鱼雷上的合力(N)

F_x, F_y, F_z —— F 在雷体系中的坐标分量(N)

M ——作用在鱼雷上的合力相对浮心 B 的力矩(N · m)

M_x, M_y, M_z —— M 在雷体系中的坐标分量(N · m)

X, Y, Z ——粘性类流体动力在雷体系中的坐标分量(N)

C_X, C_Y, C_Z ——力 X, Y, Z 的无量纲量, $C_X = X / \left(\frac{1}{2} \rho V_T^2 S \right)$,

$$C_Y = Y / \left(\frac{1}{2} \rho V_T^2 S \right), C_Z = Z / \left(\frac{1}{2} \rho V_T^2 S \right)$$

R, M, N ——粘性类流体动力相对浮心 B 的力矩在雷体系中的坐标分量(N · m)

C_R, C_M, C_N ——力矩 R, M, N 的无量纲量, $C_R =$

$$R / \left(\frac{1}{2} \rho V_T^2 S L \right), C_M = M / \left(\frac{1}{2} \rho V_T^2 S L \right), C_N =$$

$$N / \left(\frac{1}{2} \rho V_T^2 S L \right)$$

ΔR_P ——推进器的失衡力矩(N · m)

C_{RP} ——推进器的失衡力矩系数, $C_{RP} =$

$$\Delta R_P / \left(\frac{1}{2} \rho V_T^2 S L \right)$$

C_D ——阻力系数。阻力 D 与速度方向相反, $C_D =$

$$D / \left(\frac{1}{2} \rho V_T^2 S \right)$$

C_L ——升力系数。升力 L 在鱼雷纵平面内, 垂直速度向

$$\text{上}, C_L = L / \left(\frac{1}{2} \rho V_T^2 S \right)$$

- J_x, J_y, J_z ——鱼雷相对雷体系三个坐标轴的转动惯量($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
 $\lambda_{11}, \lambda_{22}, \lambda_{33}$ ——附加质量(kg)
 $\lambda_{26}, \lambda_{35}$ ——附加静矩($\text{kg} \cdot \text{m}$)
 $\lambda_{44}, \lambda_{55}, \lambda_{66}$ ——附加惯量($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
 α, β ——鱼雷运动的冲角,侧滑角(rad)
 $\delta_e, \delta_r, \delta_d$ ——鱼雷的升降舵角,方向舵角,差动舵角(rad)
 $\dot{u}, \dot{v}, \dot{w}$ —— u, v, w 对时间 t 的导数, $\dot{u} = \frac{\partial u}{\partial t}, \dot{v} = \frac{\partial v}{\partial t}, \dot{w} = \frac{\partial w}{\partial t}$
 $\dot{p}, \dot{q}, \dot{r}$ —— p, q, r 对时间 t 的导数
 C_Y^α, C_N^α —— C_Y, C_N 对 α 的位置导数
 $C_Y^{r'}, C_N^{r'}$ —— C_Y, C_N 对 r' 的旋转导数
 $C_Y^{\delta_e}, C_N^{\delta_e}$ —— C_Y, C_N 对 δ_e 的舵导数
 C_Z^β, C_M^β —— C_Z, C_M 对 β 的位置导数
 $C_Z^{q'}, C_M^{q'}$ —— C_Z, C_M 对 q' 的旋转导数
 $C_Z^{\delta_r}, C_M^{\delta_r}$ —— C_Z, C_M 对 δ_r 的舵导数
 $C_Z^{p'}, C_R^{p'}$ —— C_Z, C_R 对 p' 的旋转导数
 $C_Y^{\alpha|\alpha|}, C_N^{\alpha|\alpha|}$ —— C_Y, C_N 非线性表达式中 $\alpha|\alpha|$ 项的系数
 $C_Y^{\alpha|r'|}, C_N^{\alpha|r'|}$ —— C_Y, C_N 非线性表达式中 $\alpha|r'|$ 项的系数(其余类同)
 $\alpha_0, \delta_0, \delta_{d0}$ ——平衡冲角,平衡舵角,平衡差动舵角(rad)
 $\bar{L}_\alpha, \bar{L}_r$ ——纵向无量纲位置力臂,旋转力臂
 \bar{L}_β, \bar{L}_q ——横向无量纲位置力臂,旋转力臂
 G_r, G_q ——纵向动稳定度,横向动稳定度
 K_r, T_r ——纵向运动 r 的放大倍数,时间常数, $K_r' = K_r \left(\frac{L}{V_T} \right), T_r' = T_r \left(\frac{V_T}{L} \right)$

K_q, T_q ——横向-横滚运动 q 的放大位数,时间常数, $K'_q =$

$$K_q \left(\frac{L}{V_T} \right), T'_q = T_q \left(\frac{V_T}{L} \right)$$

$W_r(s), W_a(s)$ ——纵向运动参数 r, a 的传递函数

$W_q(s), W_\beta(s), W_p(s), W_\varphi(s)$ ——横向-横滚运动参数 $q, \beta, p,$
 φ 的传递函数

a_{ij} ——扰动方程的系数, $i = 2, 3, \dots, 6, j = 1, 2, \dots, 6$

ω ——正弦操舵的角频率(1/s)

L_r, φ_r ——纵向运动参数 r 的幅频特性(dB),相频特性($^\circ$)

L_q, φ_q ——横向-横滚运动参数 q 的幅频特性(dB),相频特性($^\circ$)

D_c ——水平面定常回转直径(m), $\overline{D}_c = D_c/L$

T_c ——水平面定常回转周期(s), $T'_c = T_c V_T/L$

ψ_c ——水平面回转和回舵运动的执行偏航角(rad)

$t_{\psi c}$ ——水平面回转和回舵运动的衰减时间(s), $t'_{\psi c} =$
 $t_{\psi c} V_T/L$

t_a ——Z形操舵或梯形操舵运动的初转期(s), $t'_a =$
 $t_a V_T/L$

t_{0v} ——水平面(垂直面)Z形操舵运动的偏航角(俯仰角)超越时间(s), $t'_{0v} = t_{0v} V_T/L$

θ_c ——垂直面梯形操舵运动的执行俯仰角(rad)

$t_{\theta c}$ ——垂直面梯形操舵运动的衰减时间(s), $t'_{\theta c} =$
 $t_{\theta c} V_T/L$

D_s ——空间定常螺旋运动弹道在水平面内投影直径(m), $\overline{D}_s = D_s/L$

ΔY_c ——升距,即空间定常螺旋运动回转 360° 时深度的改变量(m), $\overline{\Delta Y}_c = \Delta Y_c/L$

a ——鳍舵的展长(m), $\overline{a} = a/D$