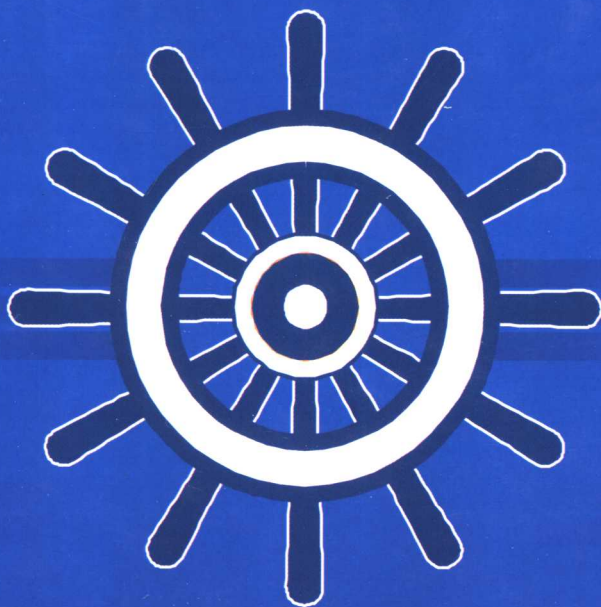


Analysis and Design of Performance of Underwater Launched Capsules

水下运载器性能的分析与设计

荣建德 著

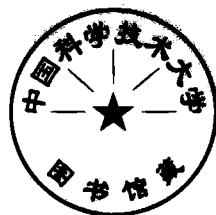


国防工业出版社
National Defense Industry Press

水下运载器性能的分析与设计

Analysis and Design of Performance
of Underwater Launched Capsules

荣建德 著



国防工业出版社

· 北京 ·

图书在版编目(CIP)数据

水下运载器性能的分析与设计/荣建德著. —北京:国防工业出版社, 2008. 1

ISBN 978-7-118-05195-7

I. 水… II. 荣… III. ①水下运行器—性能分析②水下运行器—设计 IV. P754.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 078002 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)

国防工业出版社印刷厂印刷

新华书店经售

*

开本 710×960 1/16 印张 18¼ 字数 334 千字

2008 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2500 册 定价 64.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

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。为了促进国防科技和武器装备建设事业的发展,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,原国防科工委于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. 在国防科学技术领域中,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,对国防科技和武器装备发展具有较大推动作用的专著;密切结合国防现代化和武器装备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,密切结合国防现代化和武器装备现代化需要的新工艺、新材料内容的专著。
4. 填补目前我国科技领域空白并具有军事应用前景的薄弱学科和边缘学科的科技图书。

国防科技图书出版基金评审委员会在总装备部的领导下开展工作,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,由总装备部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,原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和武器装备建设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 第五届评审委员会组成人员

主任委员 刘成海

副主任委员 王 峰 张涵信 程洪彬

秘书长 程洪彬

副秘书长 彭华良 蔡 镭

委 员 (按姓氏笔画排序)

于景元 王小谟 甘茂治 刘世参 杨星豪

李德毅 吴有生 何新贵 佟玉民 宋家树

张立同 张鸿元 陈冀胜 周一宇 赵凤起

侯正明 常显奇 崔尔杰 韩祖南 傅惠民

舒长胜

本书主审委员 侯正明

序

无动力运载器是一种新型的水下航行器,可用作干式发射潜射反舰武器的水下运载平台和水面发射平台。这种发射技术在 20 世纪 80 年代才取得突破,它在干式发射各类潜射战术武器中有着广阔的应用发展空间。

运载器的运动性能是运载器综合性能的主要体现,是运载器整体设计水平的综合反映;运载器性能设计决定运载器运动性能之优劣乃至运载器设计的成败。就此意义而言,性能设计在运载器设计中占有主导地位。

《水下运载器性能的分析与设计》是作者基于多年从事水下无动力运载器性能研究的成果撰写而成的,可谓水到渠成。它是该领域内国内的第一部学术专著。全书内容分运载器运动的数学建模、性能分析、性能设计等三部分共十章,全面系统地构建了运载器性能设计的概念、原理、方法的完整体系,形成了无动力运载器性能的设计理论。

该书学术水平高,内容系统、完整、实用,有创见。它从动力学与设计的角度全面阐明无动力运载器的运动性能;系统地建立运载器运动性能的理论分析方法和简捷分析方法,进而揭示运载器的运动规律及其物理本质;严谨地导出运载器纵向、横侧向运动稳定性判据;首次全面、完整地提出无动力运载器的构型设计原理。贯穿这些创见的学术思想乃至全书,无论对开发此类水下航行器的专业科技人员,还是对高等院校、科研院所的研究生都具有重要参考价值。

彭开

2006 年 8 月

前 言

无动力运载器是一种不设推进装置和闭环航行控制系统的水平潜射斜出水的浮力式水下航行器,用作干式发射潜对舰导弹的水下运载平台和水面发射平台。它在干式发射各类潜射战术武器中有着广阔的应用发展空间。它的基本特征,特别是正浮力、水平发射斜出水、无动力、无控等特征,决定其具有独特的流体动力布局、水弹道方案和特有的运动特性,使之成为新一类特种水下航行器。

运载器性能设计理论主要用于指导运载器性能设计,服务于运载器设计。本书旨在研究并建立运载器性能的设计理论,即构建运载器运动性能设计的概念、原理、方法的体系。它以飞行(航行)动力学、流体力学、系统与控制理论为理论基础,以实验为依据建立简化力学模型,用演绎推理方法导出该设计理论的主要结论。

本书内容由相互关联的三部分(分十章)构成一个有机的整体。第一部分建立描述运载器运动的数学模型,奠定运载器运动分析的理论基础。第二部分分析研究运载器的运动性能,以六个运动特性(快速性、机动性、平衡特性、运动稳定性、操纵性、干扰运动特性)为纲,建立运载器性能的理论分析方法和简捷分析方法,进而揭示运载器的运动规律及其物理本质;在此基础上导出运动稳定性判据,建构运载器构型设计原理。第三部分提出运载器性能设计原理,包括弹道设计原理和流体动力布局设计原理。

虽然作者主观上作了努力,力求建立的这一设计理论具有全面性、逻辑性、系统性及实用性,但未必能很好实现;再者书中难免会有错误与浅陋之处,敬请读者不吝教正。希望本书能起到抛砖引玉的作用。

本书由颜开研究员、王宝寿研究员审稿;肖业伦教授、陈九锡教授认真地审阅了书稿并提出了许多宝贵的意见;全书插图由张明辉硕士绘制与扫描;书稿的文字处理工作全部由沈慧女士完成;在此对他们表示衷心的感谢。本书是在中国船舶科学研究中心及其第六研究室的领导关心、支持下完成的;在相关研究项目中得到了潘曾鸿、邢经田、廖伦鹏、白建成、刘求真、邢天安、杨其连、毛鸿羽、范有朋、杨润法、施国庆、程贯一、惠昌年、吴品奇、李天森、何海珊等诸位领导与同仁多年来的帮助;还有家人的支持与帮助;在此一并向他们表示深切的谢意。

作者

2005年8月

目 录

导论	1
第一章 运载器一般运动方程	9
1.1 坐标系和坐标变换	10
1.1.1 坐标系的定义	11
1.1.2 运载器运动参数的定义	12
1.1.3 各坐标系之间的几何关系	14
1.1.4 矢量运算同矩阵运算的关系	15
1.1.5 坐标变换与坐标变换矩阵	16
1.1.6 矢量导数的坐标变换	20
1.1.7 张量的坐标变换	21
1.2 作用在运载器上的外力	22
1.2.1 流体动力	22
1.2.2 浮力	32
1.2.3 重力	32
1.2.4 波浪干扰力和折翼展开力	33
1.3 运载器一般运动方程	33
1.3.1 运载器动力学方程	33
1.3.2 运载器运动学方程	40
1.3.3 几何关系方程	43
1.3.4 B-B体系运载器一般运动方程	44
1.3.5 H-B体系运载器一般运动方程	46
第二章 运载器运动方程的线性化	49
2.1 概述	49
2.2 建立两组小扰动方程的条件、方法及步骤	50
2.2.1 运动方程线性化的条件及方法	52
2.2.2 小扰动方程分离成两组的条件	53
2.2.3 系数“冻结”法	54
2.2.4 推导两组小扰动方程的步骤	54
2.3 运载器纵向小扰动方程	55

2.3.1	从 H-B 体系运载器一般运动方程分离出姿态运动方程	55
2.3.2	纵向姿态运动方程	57
2.3.3	纵向小扰动方程	58
2.4	运载器横侧向小扰动方程	63
2.4.1	从 B-B 体系运载器一般运动方程分离出姿态运动方程	63
2.4.2	横侧向姿态运动方程	64
2.4.3	横侧向小扰动方程	67
2.5	状态方程	72
2.5.1	纵向小扰动状态方程	74
2.5.2	横侧向小扰动状态方程	75
第三章	运载器的平衡特性与机动性	77
3.1	运载器的定常直线运动方程	77
3.2	运载器定常直线运动的解	78
3.3	运载器的平衡特性和深水发射构型设计原理	80
3.3.1	平衡特性	80
3.3.2	深水发射构型设计原理	82
3.4	运载器的机动性	83
3.4.1	运载器的机动性与过载的概念	83
3.4.2	铅垂平面内机动的航行原理	83
3.4.3	法向过载同运动参数的关系	84
3.4.4	弹道曲率半径同法向过载的关系	84
3.4.5	运载器在铅垂平面内机动的法向过载和弹道曲率半径	84
3.4.6	运载器的需用法向过载和可用法向过载	85
3.4.7	弹道曲率半径的估算	85
第四章	分析运载器运动稳定性的方法	87
4.1	研究运动稳定性的意义	87
4.2	运动稳定性的定义	88
4.2.1	平衡状态运动稳定性的定义	88
4.2.2	运动稳定性的定义	91
4.3	运动稳定性的一些基本概念	93
4.4	李雅普诺夫第一方法(间接法)	97
4.5	李雅普诺夫第二方法(直接法)	100
4.5.1	李雅普诺夫稳定性基本定理	100
4.5.2	判断稳定和不稳定的定理	101
4.5.3	渐近稳定的附加条件	103
4.5.4	李雅普诺夫第二方法的一些基本概念	104

4.6	运动稳定性的一种数值分析方法	105
4.6.1	方法概述	106
4.6.2	运载器姿态运动方程及其求解方法	110
4.6.3	运载器姿态扰动方程及其求解方法	113
4.6.4	姿态扰动运动的动能 $T(t)$ 和运动稳定性计算	115
4.6.5	运载器姿态小扰动方程及其求解	117
4.7	分析运载器运动稳定性的方法	117
第五章	运载器的纵向运动稳定性	121
5.1	纵向自由扰动运动	122
5.2	纵向自由扰动运动的求解	123
5.2.1	纵向自由扰动运动的拉普拉斯变换解法	123
5.2.2	由状态方程求解纵向自由扰动运动	127
5.3	特征值及特征矢量	130
5.3.1	纵向特征值	131
5.3.2	纵向特征矢量	132
5.4	纵向自由扰动运动的两个阶段	134
5.5	实例	136
5.6	快衰减运动的简捷分析	139
5.6.1	快衰减运动扰动运动方程	139
5.6.2	快衰减运动扰动运动方程的简化	140
5.6.3	快衰减模态特征值的表达式	141
5.7	快衰减运动稳定性判据和纵向构型设计原理	143
5.7.1	快衰减运动模态的稳定性判据—— $Q > 0$	143
5.7.2	运载器纵向构型设计原理	144
第六章	运载器的横侧向运动稳定性	146
6.1	横侧向自由扰动运动特性	148
6.1.1	横侧向特征值	148
6.1.2	横侧向特征矢量	149
6.1.3	横侧向自由扰动运动的两种运动模态	149
6.2	实例	149
6.3	横侧向自由扰动运动的简捷分析	152
6.3.1	非周期衰减 2 自由度系统	153
6.3.2	振荡衰减 2 自由度系统	155
6.4	运载器横侧向构型设计原理	170
第七章	运载器的动态响应特性	172

7.1	纵向传递函数及其简化	173
7.1.1	纵向传递函数	173
7.1.2	纵向传递函数的简化	176
7.2	纵向操纵性	180
7.2.1	在俯仰舵阶跃偏转下快衰减运动的动态响应	180
7.2.2	瞬态分量的动态品质	185
7.2.3	稳态值	186
7.2.4	快衰减运动中操纵性同稳定性的关系	186
7.3	纵向干扰运动特性	187
7.3.1	在阶跃俯仰干扰力矩 $M_z(t)$ 作用下快衰减运动的动态响应	187
7.3.2	在阶跃法向干扰力 $F_y(t)$ 作用下快衰减运动的动态响应	189
7.3.3	在阶跃干扰攻角 $\alpha_0(t)$ 作用下快衰减运动的动态响应	190
7.3.4	快衰减运动中干扰运动特性同稳定性的关系	191
7.4	横侧向传递函数及其简化	192
7.4.1	横侧向传递函数	192
7.4.2	横侧向传递函数的简化	198
7.4.3	标准形式的横侧向简化传递函数	200
7.5	横侧向干扰运动特性	204
7.5.1	在阶跃干扰侧滑角 $\beta_0(t)$ 作用下横侧向振荡运动的 动态响应	206
7.5.2	在阶跃横滚干扰力矩 $M_x(t)$ 作用下横侧向振荡运动的 动态响应	209
7.5.3	在阶跃侧向干扰力 $F_z(t)$ 作用下横侧向振荡运动的 动态响应	212
7.5.4	横侧向干扰运动特性的近似分析	214
第八章	运载器性能设计的基本要求	219
8.1	运载器运动性能设计概述	219
8.2	运载器的战术技术要求和基本特征	220
8.3	运载器性能设计的基本要求	221
8.3.1	运载器弹道的功能要求与性能要求	221
8.3.2	运载器性能设计的基本要求	222
第九章	运载器弹道设计原理	226
9.1	运载器弹道与四个基本要素的关系	226
9.2	运载器弹道方案的设计原理	228
9.2.1	弹道方案的总体构思	228
9.2.2	弹道方案的设计原理	229

9.3	运载器弹道控制参数设计	232
9.4	运载器运动特性设计原理	234
9.4.1	快速性设计	235
9.4.2	机动性设计	237
9.4.3	平衡特性设计	239
9.4.4	运动稳定性设计	240
9.4.5	操纵性设计	250
9.4.6	干扰运动特性设计	252
第十章	运载器流体动力布局设计原理	255
10.1	运载器流体动力布局设计的依据与实质	255
10.2	运载器流体动力布局形式设计原理	255
10.2.1	运载器绕流的基本形态	257
10.2.2	运载器流体动力布局形式设计的基本问题	257
10.2.3	尾翼布局形式设计原理	263
10.3	运载器部件流体动力外形设计原理	267
10.3.1	主体外形设计原理	267
10.3.2	翼型选择原则	268
10.3.3	运载器尾翼外形设计原理	269
参考文献		271

CONTENTS

Introduction	1
Chapter 1 General Equations of Capsule Motion	9
1.1 Coordinate Systems and Transformation of Coordinates	10
1.1.1 Definitions of Coordinate Systems	11
1.1.2 Definitions of Motion Parameters	12
1.1.3 Geometrical Relationship between Coordinate Systems	14
1.1.4 Relationship between Vector Operation and Matrix Operation	15
1.1.5 Transformation of Coordinates and Their Transformation Matrix	16
1.1.6 Coordinate Transformation of the Derivative of a Vector	20
1.1.7 Coordinate Transformation of a Tensor	21
1.2 Extraneous Forces Acting on Capsules	22
1.2.1 The Hydrodynamic Forces	22
1.2.2 Buoyancy	32
1.2.3 Gravity	32
1.2.4 Disturbing Force due to Wave and Force due to Folded-Wing Spreading	33
1.3 General Equations of Capsule Motion	33
1.3.1 Dynamical Equations	33
1.3.2 Kinematical Equations	40
1.3.3 Geometrical Equations	43
1.3.4 General Equations of Capsule Motion (B-B System)	44
1.3.5 General Equations of Capsule Motion (H-B System)	46
Chapter 2 The Linear Equations of Capsule Motion	49
2.1 Introduction	49
2.2 Conditions, Methods, and Steps to Form Two Sets of Small-Disturbance Equations	50
2.2.1 Conditions and Methods for Linearizing Equations of Motion	52
2.2.2 The Conditions to Separate into Two Sets of	

Small-Disturbance Equations	53
2. 2. 3 Coefficient "Freeze" Method	54
2. 2. 4 Steps of Deriving Two Sets of Small-Disturbance Equations	54
2. 3 Longitudinal Small-Disturbance Equations of Capsules	55
2. 3. 1 Equations of Attitude Motion Separated from General Equations (H-B System)	55
2. 3. 2 Longitudinal Equations of Attitude Motion	57
2. 3. 3 Longitudinal Small-Disturbance Equations	58
2. 4 Lateral Small-Disturbance Equations of Capsules	63
2. 4. 1 Equations of Attitude Motion Separated from General Equations (B-B System)	63
2. 4. 2 Lateral Equations of Attitude Motion	64
2. 4. 3 Lateral Small-Disturbance Equations	67
2. 5 The State Equations of Two Sets of Small-Disturbance Equations	72
2. 5. 1 Longitudinal State Equations	74
2. 5. 2 Lateral State Equations	75
Chapter 3 Equilibrium Characteristics and Maneuverability of Capsules	77
3. 1 Equations of Steady Rectilinear Motion of Capsules	77
3. 2 Solution for the Equations of Steady Rectilinear Motion of Capsules	78
3. 3 Equilibrium Characteristics and Design Principles for Deepwater Launched Configuration of Capsules	80
3. 3. 1 Equilibrium Characteristics of Capsules	80
3. 3. 2 Design Principles for Deepwater Launched Configuration of Capsules	82
3. 4 Maneuverability of Capsules	83
3. 4. 1 Concepts of Maneuverability and Overload	83
3. 4. 2 Navigation Principles in Maneuvering in Vertical Plane	83
3. 4. 3 Relationship between Normal Overload and Motion Parameters	84
3. 4. 4 Relationship between Ballistic Radius of Curvature and Normal Overload	84
3. 4. 5 Normal Overload and Ballistic Radius of Curvature in Maneuvering in Vertical Plane	84

3. 4. 6	Required and Available Normal Overload	85
3. 4. 7	Estimation of Ballistic Radius of Curvature	85
Chapter 4	Methods of Analyzing the Stability of Capsule Motion	87
4. 1	Meaning Researching Stability of Motion	87
4. 2	Definitions of Motion Stability	88
4. 2. 1	Definitions of Motion Stability at Equilibrium State	88
4. 2. 2	Definitions of Motion Stability	91
4. 3	The Some Concepts of the Motion Stability	93
4. 4	The “First Method” of Lyapunov	97
4. 5	The “Second Method” of Lyapunov	100
4. 5. 1	Main Theorems of Motion Stability of Lyapunov	100
4. 5. 2	The Theorems to Judge Stable and Unstable	101
4. 5. 3	Additional Conditions of Asymptotical Stability	103
4. 5. 4	The Some Concepts of the “Second Method” of Lyapunov	104
4. 6	A Numerically Analyzing Method of Motion Stability	105
4. 6. 1	Introduction	106
4. 6. 2	Equations of Attitude Motion of Capsules and Its Solving Methods	110
4. 6. 3	Equations of Attitude Disturbance of Capsules and Its Solving Methods	113
4. 6. 4	Kinetic Energy $T(t)$ of Attitude Disturbance and Motion Stability Prediction	115
4. 6. 5	Small-Disturbance Equations of Capsule Attitude and Its Solving Method	117
4. 7	The Methods of Analyzing the Stability of Capsule Motion	117
Chapter 5	Longitudinal Motion Stability of Capsules	121
5. 1	Longitudinal Free Disturbed Motion	122
5. 2	The Solution to Problem of Longitudinal Free Disturbed Motion	123
5. 2. 1	Methods Solving Longitudinal Free Disturbed Motion by Laplace’s Transform	123
5. 2. 2	Methods Solving Longitudinal Free Disturbed Motion from the State Equations	127
5. 3	Eigenvalues and Eigenvectors	130
5. 3. 1	Longitudinal Eigenvalues	131

5.3.2	Longitudinal Eigenvectors	132
5.4	Two Stage of Longitudinal Free Disturbed Motion	134
5.5	Example of Calculation	136
5.6	Approximate Analysis for the Short-Period Mode	139
5.6.1	The Motion Equations of the Short-Period Mode	139
5.6.2	Simplification for the Motion Equations of the Short-Period Mode	140
5.6.3	The Expressions of Eigenvalues in the Short-Period Mode	141
5.7	The Stability Criteria in the Short-Period Mode and The Principles in Longitudinal Configuration Design	143
5.7.1	The Stability Criteria in the Short-Period Mode $-Q > 0$	143
5.7.2	The Principles in Longitudinal Configuration Design of Capsules	144
Chapter 6	Lateral Motion Stability of Capsules	146
6.1	Lateral Free Disturbed Motion Characteristics	148
6.1.1	Lateral Eigenvalues	148
6.1.2	Lateral Eigenvectors	149
6.1.3	Two Mode of Lateral Free Disturbed Motion	149
6.2	Example of Calculation	149
6.3	Approximate Analysis for Lateral Free Disturbed Motion	152
6.3.1	Two Degree of Freedom System in Aperiodic Decay	153
6.3.2	Two Degree of Freedom System in Oscillation Decay	155
6.4	The Principles in Lateral Configuration Design of Capsules	170
Chapter 7	Dynamical Response Characteristics of Capsules	172
7.1	Longitudinal Transfer Functions and Its Simplification	173
7.1.1	Longitudinal Transfer Functions	173
7.1.2	Simplification of Longitudinal Transfer Functions	176
7.2	Longitudinal Control	180
7.2.1	The Short-Period Mode Response to Elevator Step Input	180
7.2.2	Dynamic Quality of Transient Component	185
7.2.3	Static Characteristics	186
7.2.4	Relationship between Control and Stability in Short-Period Mode	186
7.3	Longitudinal Interference Motion Characteristics	187
7.3.1	The Short-Period Mode Response to Step Input of Interference	