

乐美龙 著

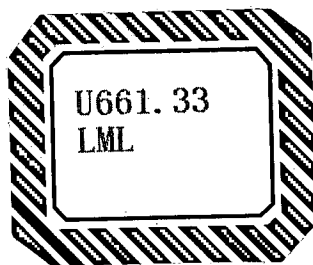
船舶操纵性预报与 港航操纵运动仿真



上海交通大学出版社

船舶操纵性预报与 港航操纵运动仿真

乐美龙 著



上海交通大学出版社

内 容 简 介

本书对涉及船舶操纵性预报和港航操纵运动仿真的有关问题进行了充分的论述,详细地介绍了涉及仿真数模的各项参数的计算方法、完整的船舶操纵运动水动力计算模型和其仿真实现。

全书共九章,内容包括船舶操纵性仿真预报、ANN 及其非线性映射机理分析、船舶操纵性神经网络计算、港航操纵运动仿真一般论述、船舶操纵运动仿真、港航操纵运动仿真环境的建立、港航操纵运动仿真系统的通信设计等。

本书适合船舶工程、港口、航道与海岸工程、交通运输、物流工程和物流管理等相关专业的科研人员、工程技术人员、教师、研究生和本科高年级学生使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

船舶操纵性预报与港航操纵运动仿真 / 乐美龙著. — 上海: 上海交通大学出版社, 2004

ISBN 7-313-03573-X

I. 船... II. 乐... III. ①船舶操纵性—预报②进出港操纵—船舶运动—仿真 IV. ①U661.33 ②U675.98

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 002488 号

船舶操纵性预报与港航操纵运动仿真

乐美龙 著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 张天蔚

上海锦佳装璜印刷发展公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×1092 mm 1/16 印张: 7.75 字数: 181 千字

2004 年 4 月第 1 版 2004 年 4 月第 1 次印刷

印数: 1-1500

ISBN7-313-03573-X/U·115 定价: 13.00 元

版权所有 侵权必究

序

随着船舶的大型化和航道的拥挤,船舶的操纵性问题日益突出。船舶的操纵性问题不仅体现在海上避碰中,更体现在港口水域的操纵过程中。船舶在港口水域的操纵性能可用一些操纵性试验数据来体现,更可用港航船舶操纵运动仿真来获得。从港口、航道工程的角度来讲,港口、航道的可行性论证及水域设计也需要定量的方法。为此,深入开展船舶操纵性预报与港航操纵运动仿真研究,及时开展这方面的学科建设和教学,对推进这方面的研究是十分必要的。

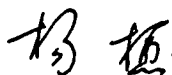
作者在对前人研究成果作了广泛深入的了解后,结合自己的科学研究与生产实践,对涉及船舶操纵运动仿真数模的有关参数进行了深入的研究、分析与具体计算;对船舶在低速、大漂角工况下的运动数模进行了详细的研究,完成了操纵运动仿真数模的四象限拓展;对风、浪、流、锚、缆、拖船、浅水和侧壁的作用进行了详细的研究与计算;最终建立了涉及桨、舵、锚、缆、拖船、风、浪、流及航道尺度作用的四象限的港航船舶操纵运动仿真数学模型。在此基础上,编制了实用的 WINDOWS 程序,研究成果显著。

人工神经网络(ANN)的应用研究是近年的热点之一。作者深入地分析了 BP 网络的非线性映射数学机理;对涉及 BP 网络的所有要素从理论和实践两方面进行了详细的研究与分析,并最终确定了针对船舶操纵性问题的计算模型。在此基础上,设计并编制了船舶操纵性神经网络计算预报程序。

结合大型船舶综合操纵模拟器的研制,作者在港航操纵运动仿真系统的其他诸方面开展了专题研究。包括仿真海区环境的建立、数据通信、数值处理等。

总之,作为一本系统论述船舶操纵性预报与港航操纵运动仿真的著作,本书的出版必将进一步推动我国在船舶操纵性预报与港航操纵运动仿真方面的研究,推动港航工程学科的发展。

中国科学院院士
上海交通大学教授



2003年12月

符号索引

- L ——两柱间长, m
 B ——型宽, m
 d ——吃水, m
 C_b ——船体方形系数
 ∇ ——排水体积, m^3
 Δ ——排水量, t
 m ——船舶质量, $kg \cdot s^2/m$
 λ_{11} ——船体纵向附连质量, $kg \cdot s^2/m$
 λ_{22} ——船体横向附连质量, $kg \cdot s^2/m$
 I_{z_g} ——船体自身绕过重心点的 Z 轴方向的转动惯矩, $kg \cdot s^2 \cdot m$
 I_z ——船体自身绕 Z 轴的转动惯矩, $kg \cdot s^2 \cdot m$
 λ_{66} ——船体在水中时绕 Z 轴的附连惯矩, $kg \cdot s^2 \cdot m$
 λ_{26} ——船体在水中时对 YOZ 平面的附连静矩, $kg \cdot s^2$
 I_x ——船体自身绕 X 轴的转动惯矩, $kg \cdot s^2 \cdot m$
 J_x ——船体在水中时绕 X 轴的附连惯矩, $kg \cdot s^2 \cdot m$
 I_P ——螺旋桨转动惯矩, $kg \cdot s^2 \cdot m$
 J_P ——螺旋桨附加惯矩, $kg \cdot s^2 \cdot m$
 Z ——桨叶数
 A_e/A_0 ——桨盘面比
 D_p ——桨直径, m
 P ——桨螺距, m
 A_R ——舵面积, m^2
 λ_R ——舵展弦比
 a_H ——舵对船体水动力影响系数
 δ ——舵角, rad, 左舰为正
 x_g ——重心 X 轴坐标, m, 艏向为正
 ρ ——水密度, $kg \cdot s^2/m^4$; 海水 $\rho=104.63kg \cdot s^2/m^4$
 γ ——水重度, kg/m^3 ; 海水 $\gamma=1025kg/m^3$
 g ——重力加速度, m/s^2 ; $g=9.81m/s^2$
 u ——速度矢量在 X 轴上的分量, m/s
 \dot{u} ——加速度矢量在 X 轴上的分量, m/s^2
 v ——速度矢量在 Y 轴上的分量, m/s
 \dot{v} ——加速度矢量在 Y 轴上的分量, m/s^2
 r ——船体绕 Z 轴的转首角速度, s^{-1}

\dot{r} ——船体绕 Z 轴的转首角加速度, s^{-2}

p ——船体绕 X 轴的横倾角速度, s^{-1}

\dot{p} ——船舶绕 X 轴的横倾角加速度, s^{-2}

n_p ——桨转速, rps, s^{-1}

\dot{n}_p ——桨旋转角加速度, s^{-2}

t ——桨滑失

w_{R_0} ——船舶直航时舵处伴流系数

w_R ——船舶机动时舵处伴流系数

w_{P_0} ——船舶直航时桨处伴流系数

w_P ——船舶机动时桨处伴流系数

β ——漂角, rad

V ——船速, m/s

ψ ——首向, rad

注: 文中符号除特别说明外, 均以此表为准。

目 录

符号索引	1
第一章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 船舶操纵运动仿真研究综述	2
1.2.1 船舶操纵运动仿真数学模型研究综述	2
1.2.2 船舶操纵性仿真预报和船舶操纵运动仿真系统的研究现状	4
第二章 船舶操纵性仿真预报	6
2.1 船舶操纵性仿真预报数学模型	6
2.1.1 基本公式	6
2.1.2 作用于船体的惯性力及力矩	7
2.1.3 作用于船体的水动力	8
2.1.4 螺旋桨推力及扭矩	11
2.1.5 舵力及其力矩	13
2.1.6 主机扭矩	15
2.2 图谱数值化方法研究	15
2.2.1 数据文件法	16
2.2.2 正弦小波拟合法	18
2.2.3 应用实例	20
2.3 船舶操纵性仿真预报	23
2.3.1 程序设计	23
2.3.2 主要仿真结果	23
2.4 本章小结	28
第三章 ANN 及其非线性映射机理分析	30
3.1 ANN 简述	30
3.2 几种常用非线性映射网络	33
3.2.1 BP 网络	33
3.2.2 RBF 网络	35
3.2.3 GMDH 网络	36
3.2.4 网络分析与选择	37
3.3 BP 网络的非线性映射机理分析	37

3.4 本章小结	40
第四章 船舶操纵性神经网络计算	41
4.1 计算原理	41
4.2 网络诸要素的确定及改进	42
4.2.1 层数的确定	42
4.2.2 关于隐节点数的探讨	42
4.2.3 神经元功能函数的确定	44
4.2.4 样本数据的预处理与样本的选择	46
4.2.5 误差的定义	47
4.2.6 非线性优化方法	49
4.2.7 学习方法的改进	52
4.3 算例	53
4.4 本章小结	58
第五章 港航操纵运动仿真一般论述	59
5.1 港航操纵运动仿真的仿真对象	59
5.2 港航操纵运动仿真的运动仿真	59
5.3 港航操纵运动仿真的仿真设备	60
5.4 港航操纵运动仿真的声像虚拟环境构造	63
5.5 港航操纵运动仿真的软件设计	64
5.6 港航操纵运动仿真的系统通信设计	64
5.7 港航操纵运动仿真的系统一般构成	65
5.8 本章小结	66
第六章 船舶操纵运动仿真	67
6.1 船舶操纵运动仿真数学模型	67
6.1.1 基本数学模型	67
6.1.2 风的作用力	67
6.1.3 流的作用力	68
6.1.4 波浪漂移力	69
6.1.5 锚链力	70
6.1.6 缆力	71
6.1.7 拖船力	71
6.1.8 浅水影响	72
6.1.9 侧壁效应	74
6.2 船舶操纵运动仿真	74
6.2.1 程序设计	74
6.2.2 主要可比仿真结果	75

6.3 本章小结	75
第七章 港航操纵运动仿真环境的建立	76
7.1 港航操纵运动仿真环境数据的建立	76
7.1.1 海图数据的录入	76
7.1.2 海图数据的组织	77
7.2 港航操纵运动仿真环境数据的快速显示	78
7.2.1 TMS340 系列图形图像加速板简介	79
7.2.2 海图图式的制作	80
7.2.3 海图显示与通信	80
7.3 港航操纵运动仿真离散环境数据的检索	82
7.3.1 索引矩阵与偏移量的映射关系	82
7.3.2 数据的分时检索算法	82
7.3.3 应用实例	84
7.4 港航操纵运动仿真连续环境数据的计算	85
7.4.1 多边形间距离计算方法	86
7.4.2 应用实例	88
7.5 本章小结	89
第八章 港航操纵运动仿真系统的通信设计	91
8.1 提高通信系统高效可靠的一般分析	91
8.2 通道扩充与直接驱动程序的设计	91
8.2.1 CONTEC COM-4M 多路异步通信卡简述	92
8.2.2 COM-4M 卡直接驱动程序的设计	92
8.3 线路连接与握手	96
8.4 通信信息压缩	97
8.4.1 信息压缩的基本思想	97
8.4.2 船舶运动数据的先期压缩	98
8.4.3 字符数据与数值数据的混合编码	98
8.4.4 应用实例	99
8.5 检纠错	100
8.6 本章小结	102
第九章 结论与展望	103
参考文献	105

第一章 绪 论

1.1 引言

船舶操纵性是指船舶凭借其控制装置来保持或改变其运动姿态、速度和方向的能力,是船舶的重要性能之一。在传统的船舶设计中,船舶操纵性通常是通过参考母型船、利用经验计算公式和通过控制面设计来实现的。目前,这种方便实用的方法正面临着来自各方面的挑战。一是船舶的大型化,使船舶操纵性能相对恶化,为了有效削弱这种恶化程度,必须在设计阶段加强对船舶的操纵性设计;二是随着运输结构的不断优化,要求设计各种新型船舶和专用船舶,如高速、浅吃水、大受风面积的集装箱船、LNG、LPG等,为此,在设计阶段进行较为全面的操纵性设计是十分必要的;三是随着国际间经济贸易的加强,航运事业日益繁荣,通航密度相对提高,使得人们对船舶操纵性要求相对提高,对船舶操纵性的设计更加重视;四是全球范围内生态环境意识的增强,使得人们对海难事故引起的大面积生态环境的破坏更加关注,由此造成的经济赔偿也日益严厉,这进一步促使人们把船舶操纵性设计放在更加重要的位置来考虑。例如震惊世界的12万吨级利比亚油船“托利·康荣”号在英吉利海峡的沉没,导致约8万吨原油流入海洋,使英、法两国沿岸300公里海域受到污染,仅为清除油污所动用的人力、物力就花费800万美元之巨^[1]。为此,许多国家和国际海事组织(IMO)均已制订了衡量船舶操纵性能的标准,要求一定吨位以上的船舶在驾驶室中必须备有操纵性资料^[2]。我国船舶检验局也已出版了《船舶操纵性》这一指导性文件,提出了具体的船舶操纵性衡准^[3]。IMO操纵性标准一旦正式实施,对有关国家的影响将是十分显著的。许多国家,尤其是发达国家,按照惯例将不允许不符合IMO标准的本国船舶航行,也不允许不符合标准的外国船舶进入该国水域^[4]。目前,世界主要造船大国都在纷纷行动起来。美国国家研究委员会海运部(Marine Board of National Research Council)已开始了操纵仿真计划^[4]。日本在船舶操纵性仿真预报方面一直保持高投入,继船舶操纵性数学模型研究小组(MMG)卓有成效的工作之后,造船协会运动性能委员会又成立了低速、浅水域操纵性能检讨专门委员会(MSS)^[5],开展对浅水、低速等情况的操纵性预报研究。欧洲各主要造船国也积极开展相关研究,尤其是包括操纵性设计在内的船舶设计软件包的开发和操纵仿真系统的开发,对船舶操纵性的要求正在逐渐步入法律化、规范化、全面化轨道。可以说,船舶操纵性预报已经作为一项船舶设计的重要内容而日益受到船舶设计工作者和有关方面的高度重视。

通常,操纵性预报是通过自由船模试验、经验方法或经验公式来完成的。其中经验方法一般用于借助于母型船进行设计,诸如系列60、MARAD系列等。在新船型设计及迎合新的操纵性要求方面,该方法难以使用。而经验公式方法由于其应用范围的限制,也难以完成较为全面的预报工作。自由船模试验方法能比较直观地反映船舶的主要操纵特性,长期以来,一直受到人们的重视。但由于船舶设计是一个逐步细化和不断优化的过程,诸多参数需反复优化,给该类方法的应用造成一定的困难。

随着船舶操纵运动方程的建立和计算机的推广使用,人们逐步利用操纵运动方程,结合拘束模型试验得到的水动力导数,进行操纵性仿真预报。在20世纪50~70年代,世界上主要造船国家先后建造的一批专门用于拘束船模试验以确定各水动力导数的大型设备。如回转臂水池(RA)、平面运动机构(PMM)和X-Y拖车等,就是一个明显的标志。这些设备的建立和使用,反过来极大地推动了船舶操纵性仿真预报研究的进程。值得一提的是,1969年第12届国际拖曳水池会议(ITTC)组织的“航海者(Mariner)”型货船各种水动力导数的世界比测试验。它证实了利用操纵模型预报船舶非线性运动的可能性^[6]。从此,操纵性仿真预报方法逐渐为人们所接受。

船舶操纵性神经网络计算方法不同于船舶操纵性仿真预报方法,它通过构造一种神经网络结构和训练方法完成船舶参数与船舶操纵性指标的映射,即船舶操纵性神经网络计算是指船舶参数空间与船舶操纵性指标空间的一种非线性映射。由于是一种纯映射关系,因此,作为输入参量的船舶参数具有一定的自由度。它既可为主尺度参数,也可涉及船舶操纵性的所有参数,比较符合船舶设计的循序渐进的过程。同时由于它是一种基于经验数据的学习方法,不同任何中间参量(水动力导数等)发生关系,因此也不存在尺度效应。它的精度主要取决于学习量及网络特性。神经网络计算程序一旦编制完成,使用较为方便,可实现完全的交互性。因此,作为一种方便实用的新方法,操纵性神经网络计算方法由于可完成对目前操纵性衡准所要求内容的预报而显示出良好的应用前景。

港航操纵运动仿真是从动态的角度,综合考虑人、船、环境的相互作用,来全面仿真船舶的操纵运动过程。它把对操纵运动仿真的研究从理想的无限水域的仿真转向实际水域的仿真。开展港航操纵运动仿真研究的意义是十分明显的,从操纵性预报的角度来说,它可谓是操纵性预报方法的必然归宿。因为就实际操纵而言,船舶的操纵经常处在一种风、浪、流、浅水、航道、锚等外力和环境综合作用下的四象限多工况状态,很多重要的操纵行为,譬如靠离码头过程和紧急避让过程,就处于这样一种外力和环境综合作用下的操纵状态。鉴于此,我国船舶标准化委员会建议,所谓船舶操纵性是泛指保持和改变航向、航速和位置的性能^[6]。目前之所以将操纵性要求局限在几个标准试验里,主要是考虑到其方便性和可操作性^[7]。随着操纵运动仿真精度的提高和预报方法的日益完善,阻止人们进行操纵性全面预报的一些客观因素将逐渐被消除,操纵性标准也将逐渐面向这些对船舶安全至关重要的操纵问题。另外,对航行于特定航区的船舶操纵性设计,客观上也将逐渐要求考虑其具体的航行环境。对作为操纵主体的人来说,船舶操纵能力的培养不可能完全依靠风险较大的实船操纵来完成,必须通过操纵运动仿真系统进行强化。为此,IMO和我国海事部门要求有关航海人员在进行实船操纵前先在操纵模拟器上进行强化训练。IMO和我国海事部门的这一要求不久将由建议变为强制。除应用于船舶工程外,港航操纵运动仿真在港口工程、港航企业生产组织与管理、海事预防与海事分析、航海人员培训等诸多方面有着广泛的应用,也是相关行业科学设计、科学决策、科学管理的基础之一。

1.2 船舶操纵运动仿真研究综述

1.2.1 船舶操纵运动仿真数学模型研究综述

自从1946年戴维逊(K. S. M. Davidson)和许夫(L. I. Schiff)首次给出操纵运动方程以

来,有关船舶操纵运动数学模型的研究基本上从两方面着手。一是从基本运动方程出发,通过确定其水动力,进而求解其运动参数的水动力模型的研究;二是运用控制理论,将船舶看作为一个动态系统,操舵作为输入,运动作为输出的响应模型的研究。在水动力模型研究方面,布朗(G. H. Bryan)直观地创立的用“缓慢运动导数”来表达流体动力的方法和米诺尔斯基(N. Minorsky, 1922)、库查尔斯基(W. Kucharski, 1932)、温布轮(G. Weinblum)等人把船舶作为类似于机翼和飞艇的物体来研究其操纵性的方法,对以后的研究产生了深远的影响。1967年阿勃柯维奇(M. A. Abokowitz)以泰勒级数展开的方式,严格推导出的六自由度船舶运动方程,为非线性模型的建立奠定了数学基础。切斯莱(M. S. Chislett)等人利用阿勃柯维奇方程和PMM测定的水动力导数,用计算机完成的对“航海者(Mariner)”号的螺旋桨试验、回转试验和Z形操纵的成功计算,使人们看到了操纵运动方程的实用价值。之后,很多专家学者都投入到操纵运动方程的实用性研究上来,包括确定水动力导数项、测定水动力导数及提出水动力的计算公式。在这些研究中,影响比较大的有:

1968年,阿尼西莫娃给出了一组非线性水动力的系列化模型试验结果。

1969年,第12届国际拖曳水池会议(ITTC)组织的“航海者(Mariner)”型货船各种水动力导数的世界比测试验。

克拉克(D. Clarke)在收集了大量拘束船模试验资料和36组船模旋臂试验结果的基础上,提出了计算船舶线性水动力导数的公式^[8]。

别尔舍茨根据阿尼西莫娃的风洞试验结果以及二因次流动的假设,得出了关于漂角水动力及旋转水动力的估算图谱及公式。

1976年起,日本的操纵性数学模型小组(MMG)用几年时间开发了一个分离式水动力模型,进行了系列化的拘束船模试验,系统地研究了船体、螺旋桨与舵的水动力以及它们之间的干扰作用^[9~16]。之后,平野雅祥、井上正佑等人利用这些结果提出了预报操纵性的方法^[17,18]。

这些研究,尤其是MMG所从事的比较系统的研究和提出的分离式水动力模型,为操纵性仿真预报进入工程实用打开了方便之门。

鉴于船舶在低速、浅水域中操纵的重要性和MMG模型在该条件下的不足,日本成立了MSS。对低速、浅水域及其他限制条件下的操纵性能进行了卓有成效的研究。提出了不少操纵数学模型及其对应导数的计算方法。在这些研究中,比较完整的有:

芳村康男等对船舶的纯首摇水动力进行了系列试验,提出了船舶在纯首摇状态下的船体水动力的计算方法^[19]。该方法为船舶在纯首摇状态下的船体水动力的计算,尤其是船舶在大漂角下的偏转运动计算提供了一种比较完整的方法。

鸟野庆一等从船舶纯斜航运动出发,对船舶在纯斜航情况下的船体水动力进行了一系列试验,提出了船舶在纯斜航情况下的船体水动力的计算方法^[20~25]。该方法为船舶在大漂角下平移运动的船体水动力计算,提供了一种可行的方法。

小濑邦治等从操纵流体力学的角度出发,对船舶的低速操纵运动进行了研究,提出了一种船舶在低速操纵运动时的计算模型^[26]。小濑邦治等的模型为人们进一步开展低速操纵的实用数模研究提供了方便。

贵岛胜郎等对船舶在浅水中的操纵运动进行了详细的研究,提出了船舶在浅水域中水动力导数的修正方法^[27]。贵岛胜郎等的方法使得船舶在浅水域中的船体水动力计算更加具体和合理。

正司公一等对港内机动操纵运动进行了研究,提出了一种港内机动操纵运动计算数学模型^[28]。正司公一等提出的模型为人们进一步开展对港内机动操纵运动的研究与计算奠定了一定的基础。

浜本刚实等对船舶在波浪中的操纵运动进行了研究,提出了一种基于新坐标系的船舶在波浪中的操纵运动计算数学模型^[29]。浜本刚实等的研究,由于采用了新坐标系,使得船舶所受的波浪力的计算得以简化。但由于其采用的坐标系不同于一般采用的船舶运动坐标系,因此,在使用时需进行坐标系的转换,使其计算量增加。

我国的黄国梁、楼连根等根据有关实验结果及相关研究,也提出了一种波浪中操纵运动数学模型^[30]。我国的杨宇栋根据 MSS 的报告,也提出了一种低速、大漂角操纵运动数学模型^[31]。

上述这些研究,为开展船舶操纵性全面预报奠定了一定的数模基础。

在有关数学模型的局部研究方面,国内外专家学者也开展了卓有成效的工作。如:小濑邦治、梅田直哉等对船舶前后不对称引起的影响的研究^[26,32];中武一明、芳村康男、李承建、藤野正隆、楼连根、黄国梁等对双桨船操纵问题的研究^[33~37];贵岛胜郎、P. W. Ch'ng等对侧推器作用、侧壁效应及载况影响的研究^[38~43];藤野正隆、浜本刚实、陆惠生、董国祥等人对逆转制动的研究^[44~46];A·M·博格斯洛夫斯基、汤室彰规等对船吸的研究^[47,48];杨玉详、廖河树等对锚链力的研究^[49,50];A·M·巴辛、盛子寅、赵月林等对浅水作用的研究^[51~53];汤室彰规、安川宏纪、松本宪洋等对船体、桨、舵之间相互影响的研究^[14,15,54,55];谷初藏、藤野正隆、芳村康男、蒋维清等对桨的横向力的研究^[56~75]等等。所有这些研究为建立一个更为完善的操纵运动数学模型打下了良好的基础。

在响应方程方面,自野本谦作于 1957 年提出一阶线性响应方程以来,他通过对肯夫(Kempf)提出的 Z 形试验的研究,提出了利用 Z 形试验直接确定 K、T 的方法,并开展了大量的实船研究,积累了几百艘船的 K、T 值。以后,他与诺宾(Norrbin)一起提出了两种稍微不同的二阶非线性响应方程。在这方面作出贡献的还有贝奇(Bech)、瓦格纳-斯密斯(Wagner-Smith)、藤野正隆等人,他们提出的相平面分析方法为非线性响应模型中 K、T 指数的求取提供了方便。由于响应方程通常只有一个方程,即 K、T 方程,若用于仿真还须补充船舶纵向方程,即进退方程。进退方程目前还没有较为统一的形式,它的确定一般从力学方程出发,参照野本对 K、T 方程的处理方法而定。

在操纵性研究领域,其他方面的研究与数学模型研究也是密切相关的。譬如操纵的流体力学方法。它们实际上为操纵运动数学模型的建立,如水动力导数的确定与回归等,起了指导作用。限于篇幅,不再一一罗列。

1.2.2 船舶操纵性仿真预报和船舶操纵运动仿真系统的研究现状

船舶操纵性仿真预报与船舶操纵运动数学模型的关系是相辅相成的。研究数学模型的目的就是为了计算及仿真,而仿真实践又不断促使数学模型的完善。早期的操纵性仿真预报是根据其船模的试验数据来进行某些操纵性标准试验的结果预报。这种操纵性标准试验通常不包括紧急停船试验,因为该试验要跨越 I、III、IV 三个象限,在数学模型上及仿真算法上都存在一定的困难。这种仿真预报的精度是比较高的,因为它的有关数据都来自船模实测。而从数学模型角度看,水动力导数一般取至 3 阶,对舰船这样“缓慢运动”的物体,取至 3 阶已能保证

其足够的精度。随着各种船型船模试验资料的增加,从数学模型上提出了各种水动力导数的回归公式后,船舶操纵性仿真预报与其船模试验部分相分离。即在没有船模试验资料的情况下,就可以进行操纵性预报。鉴于目前水动力导数计算公式可以仅仅与船舶主尺度有关,这就意味着在船舶初步设计阶段就可以进行操纵性预报。预报的精度与水动力导数的估算公式精度有关,而估算公式的精度一般依赖于所依据的船模资料的充分与否及回归采用的方法。目前,采用 MMG 方法在船舶初步设计中进行操纵性预报,其精度已可满足工程要求。由于资金、设备等种种原因,我国的操纵性仿真预报与 MMG 数学模型的发表有很大关系。据不完全统计,从 1982 年至今,以其使用的公开发表的操纵模型为依据(不包括使用一阶 K、T 方程、匹配方程及知识型方程等),先后有 18 人(以第一作者为准,不包括正在进行的项目)进行了操纵仿真^[76~90]。从进行操纵仿真的目的看,主要有两方面。一是为了研制操纵仿真训练系统;二是为了船舶操纵性预报。从后一种目的看,周昭明等人所从事的操纵性仿真预报为我国较早的操纵性仿真预报。他们还同时完成了井上试验数据中非线性水动力导数的回归。从操纵性仿真预报的内容看,基本上为操纵性标准试验结果的预报,包括紧急制动试验。其中紧急制动试验采用的数学模型通常与其他试验采用的数学模型不同。考虑较为全面的是李美菁等人进行的风、浪、流及浅水域中多工况操纵性预报。从操纵运动仿真系统的研究情况来看,西方主要造船大国起步较早,他们大多在 20 世纪六七十年代就已经建立了操纵运动仿真系统。如:荷兰的台尔夫流体实验室,美国的金氏波音航海实验中心,日本的广岛大学、大阪大学、川崎重工,瑞典的哥德堡国家航行实验室,法国的格勃诺尔应用水工研究所,挪威控制公司,德国 VFIV-FORK 公司等^[91]。我国的操纵运动仿真系统研究大多与研制操纵运动仿真训练系统有关。其中,海军训练器械中心和海军大连舰艇学院的操纵运动仿真训练系统的研究为我国较早的研究。之后,上海海运学院和大连海事大学也先后研制了大型船舶综合操纵模拟器。

第二章 船舶操纵性仿真预报

船舶操纵性仿真预报是指根据船舶操纵运动数学模型,给出船舶操纵性标准试验的仿真预报和数值预报。这些标准试验包括被 IMO 和我国船检局要求或建议的回转试验、Z 形试验、惯性试验、停船试验和初始回转试验。目前,覆盖上述所有操纵性预报项目的研究尚难以见到。很多有关操纵性仿真预报的研究基本限于第一象限正常工况(小漂角)。有的虽有些拓展,但拓展的预报通常采用相对比较独立的数模,比较注重于数值预报。有的虽从数模上而言,可以进行全面预报,但有关预报结果资料较少。为此,本书开展了具体研究与实践。

本章首先对用于船舶操纵性仿真预报的数学模型进行详细论述。在此基础上,给出有关实船的主要仿真结果。

鉴于图谱数值化问题在操纵仿真和仿真技术中的普遍性和重要性,本章还将对图谱数值化问题进行研究与探讨,并提出两种在仿真实践中行之有效的办法。

2.1 船舶操纵性仿真预报数学模型

2.1.1 基本公式

1) 基本假设

- (1) 船舶航行在无限深广水域。
- (2) 自由液面为静水面,视船体为刚体。
- (3) 忽略纵摇及升沉。

2) 坐标系

坐标系如图 2.1 所示。

其中:

$O'X_0Y_0Z_0$ 为固连于地球的地理位置坐标系, $OXYZ$ 为固连于船舶的动坐标系,动坐标系原点 O 为中纵剖面、中横剖面及重心平面的交点。

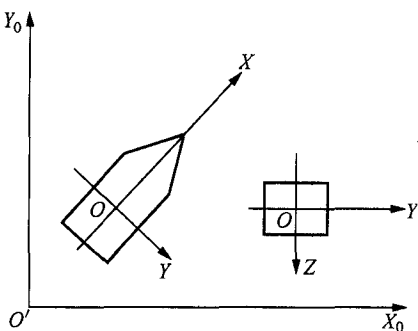


图 2.1 坐标系

在此基础上,建立船舶操纵运动基本公式如下。

3) 基本公式

$$\begin{aligned}
 & (m + \lambda_{11})\dot{u} - (m + \lambda_{22})vr - (mx_g + \lambda_{26})r^2 \\
 & = X_H + X_P + X_R \\
 & (m + \lambda_{22})\dot{v} + (m + \lambda_{11})ur + (mx_g + \lambda_{26})\dot{r} \\
 & = Y_H + Y_P + Y_R \\
 & (I_Z + \lambda_{66})\dot{r} + (mx_g + \lambda_{26})(\dot{v} + ur) \\
 & = N_H + N_P + N_R
 \end{aligned}$$

$$(I_X + J_X)\dot{p} = K_H + K_R$$

$$2\pi(I_P + J_P)\dot{n}_p = Q_p + Q_E + Q_f$$

式中: X_H, X_R, X_P ——分别为船体、舵、桨的纵向力。

Y_H, Y_R, Y_P ——分别为船体、舵、桨的横向力。

N_H, N_R, N_P ——分别为船体、舵、桨的转首力矩。

K_H, K_R ——分别为船体、舵的横倾力矩。

Q_p, Q_E, Q_f ——分别为螺旋桨扭矩、主机扭矩、摩擦力矩。

2.1.2 作用于船体的惯性力及力矩

1) 船体惯性力

$$\Delta = r\nabla$$

2) 船体自身绕 Z 轴的转动惯性矩

$$I_Z = m(K_i L)^2 \quad \text{或} \quad I_Z = (1 + C_b^{4.5})m + (L^2 + B^{2.4})/24$$

$$I_Z = I_{Zg} + mx_g^2$$

式中: K_i ——质量惯性半径系数,可取 0.24~0.25。

3) 船体附连质量、绕 Z 轴的附连惯量及附连静矩

船体附连质量、绕 Z 轴的附连惯量及附连静矩采用周昭明根据元良图谱所得的回归公式:

$$\lambda_{11}/m = 1/100\{0.398 + 11.98C_b[1 + 3.73(d/B)] - [2.89C_b(L/B)][1 + 1.13(d/B)] \\ + 0.175C_b(L/B)^2[1 + 0.541(d/B)] - 1.107(L/B)(d/B)\}$$

$$\lambda_{22}/m = 0.882 - 0.54C_b[1 - 1.6(d/B)] - 0.156(1 - 0.673C_b)(L/B)$$

$$+ 0.826(d/B)(L/B)[1 - 0.678(d/B)] - 0.638(d/B)(L/B)[1 - 0.669(d/B)]$$

$$\sqrt{\lambda_{66}/m}/L = 0.01\{33 - 76.85C_b(1 - 0.784C_b) + 3.43(L/B)(1 - 0.63C_b)\}$$

$$\lambda_{26} = 0.5\pi\rho L^2 d^2 [0.67(B/L) - 0.0033(B/d)^2]$$

4) 船体绕 OX 轴转动惯性矩及附连惯性矩

船体绕 OX 轴转动惯性矩及附连惯性矩采用杜埃尔采公式计算:

$$I_X + J_X = \Delta(B^2 + 4z_g^2)/(12g)$$

式中: z_g ——船舶重心高度。

5) 螺旋桨转矩及附加惯性矩

$$r_h \leq 0.18$$

$$I_P = 0.0948rZb_{\max}(0.5t_{0.2} + t_{0.6})D_p^3$$

$$r_h > 0.18$$

$$I_P = (0.0648 + 0.167r_h)rZb_{\max}(0.5t_{0.2} + t_{0.6})D_p^3$$

$$J_P = 0.25I_P$$

式中: r_h ——毂径比。

r ——材料密度。

b_{\max} ——桨叶最大宽度。

$t_{0.2}, t_{0.6}$ ——分别为 0.2R, 0.6R 处切面之最大厚度。

2.1.3 作用于船体的水动力

本书将船体所受的水动力分为正常工况和低速、大漂角工况两种情况。当船舶发生倒航时,按对称性将 u, v 旋转 180° 计算水动力。

2.1.3.1 正常工况

1) 船体纵向水动力

$$X_H = X_{vr}vr + X(u)$$

式中: X_{vr} ——耦合粘性水动力导数。

$$X_{vr} = (C_m - 1)\lambda_{22}$$

式中: C_m ——经验系数, $C_m = 1.6757C_b - 0.5054$ 。

$X(u)$ ——船舶直航时阻力,根据船型选用 Holtrop 法、Taylor 法及蓝波-奥芬凯勒方法。

2) 船体横向粘性水动力

$$Y_H = 0.5\rho L d V^2 \{ Y'_\beta \beta + Y'_r r' + Y'_{\beta\beta} \beta | \beta | + Y'_{\beta r} \beta | r' | + Y'_{rr} r' | r' | \}$$

式中: Y'_β 和 Y'_r ——线性水动力导数:

$$Y'_\beta = [\pi k/2 + 1.4C_b(B/L)][1 + (2/3)\tau']$$

$$Y'_r = (\pi k/4)(1 + 0.8\tau')$$

式中: $k = 2d$ 。

$$\tau' = \tau/d。$$

τ ——船体纵倾值(以尾倾为正)。

$Y'_{\beta\beta}, Y'_{\beta r}$ 和 Y'_{rr} ——非线性水动力导数。

非线性水动力导数的计算采用周昭明根据元良图谱所得的回归公式:

$$Y'_{\beta\beta} = -0.048265 + 6.293(1 - C_b)(d/B)$$

$$Y'_{\beta r} = 0.3791 - 1.28(1 - C_b)(d/B)$$

$$Y'_{rr} = 0.0045 - 0.445(1 - C_b)(d/B)$$

3) 船体首摇力矩

$$N_H = 0.5\rho L^2 d V^2 [N'_\beta \beta + N'_r r' + (N'_{\beta\beta} \beta + N'_{\beta r} r') \beta r' + N'_{rr} r' | r' |] + 0.5\rho L^2 d V^2 [0.0076\varphi + 1.72N'_\beta \beta | \varphi | - 2.35N'_r r' | \varphi |] - x_g Y_H$$

式中: N'_β 和 N'_r ——线性水动力导数。

$$N'_\beta = k(1 - 0.27\tau'/l_\beta)$$

$$N'_r = -(0.54k - k^2)(1 + 0.3\tau')$$

式中:

$$l_\beta = k/(0.5\pi k + 1.4C_b B/L)$$

式中: $N'_{\beta\beta r}, N'_{\beta r r}$ 和 N'_{rr} ——非线性水动力导数。

非线性水动力导数的计算采用周昭明根据元良图谱所得的回归公式:

$$N'_{\beta\beta r} = -6.0856 + 137.4735C_b(B/L) - 1029.514[C_b(B/L)]^2 + 2480.6082[C_b(B/L)]^3$$

$$N'_{\beta r r} = 0.0635 - 0.4414C_b(d/L)$$

$$N'_{rr} = -0.0805 + 8.6092[C_b(B/L)]^2 - 36.9816[C_b(B/L)]^3$$