

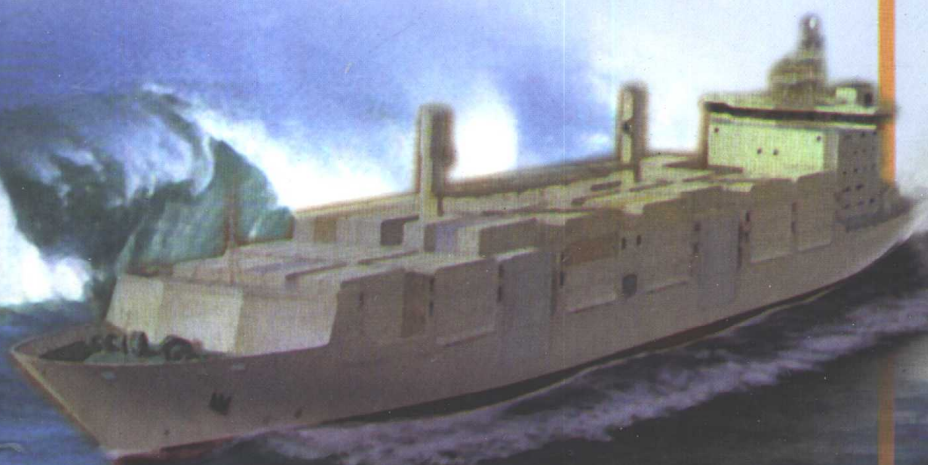
高等学校教材

船舶操纵性 与 耐波性

(船舶工程专业用)

(第二版)

吴秀恒 主编 施生达 主审



人民交通出版社

高等学校教材

船舶操纵性与耐波性

Chuanbo Caozongxing yu Naiboxing

(船舶工程专业用)

(第二版)

吴秀恒 主编
施生达 主审

人民交通出版社

内 容 简 要

本书分船舶操纵性与船舶耐波性两篇。第一篇船舶操纵性分九章,讲述船舶操纵性的基本理论和工程实用计算方法,着重阐明船舶操纵运动方程、运动状况分析和计算以及操纵性试验方法。第二篇船舶耐波性分六章,讲述船舶在风浪中的摇荡运动,着重阐明船舶摇荡运动的基本理论和预报方法以及耐波性试验和减摇装置。

本书为高等学校船舶工程专业的教材,也可供船舶设计、建造、检验、科研人员,航运管理人员和航海驾驶专业人员及有关专业的研究生参考。

图书在版编目(CIP)数据

船舶操纵性与耐波性/吴秀恒主编. -2版. -北京:人民交通出版社,1999
ISBN 7-114-03260-9
I. 船… II. 吴… III. ①船舶操作性②船舶-耐波性 IV
.U661.3

中国版本图书馆 CIP 数据核字(1999)第 03928 号

高等学校教材
船舶操纵性与耐波性
(船舶工程专业用)
(第二版)
吴秀恒 主编
施生达 主审

责任印制:杨柏力 版式设计:刘晓方 责任校对:刘素燕

人民交通出版社出版
(100013 北京和平里东街 10 号)
新华书店北京发行所发行
各地新华书店经销
北京鑫正大印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:14.25 字数:352 千

1988 年 12 月第 1 版

1999 年 8 月 第 2 版 第 1 次印刷

印数:0001—3000 册 定价:18.20 元

ISBN 7-114-03260-9
U·02321

第二版前言

船舶操纵性和耐波性是船舶航行的重要性能，它与船舶的使用效能和航行安全有密切关系。随着航运事业的发展，船舶航行密度增大，航速提高，加之船舶大型化、专门化和在限制水域中航行，各国和各航运部门对船舶操纵性和耐波性的要求更加明确、严格，在船舶设计和建造过程中进行更多、更精确的预报、计算和试验。《船舶操纵性与耐波性》就是为适应这种形势发展的需要，根据全国高等工业学校造船专业教材会议精神和交通系统教材会议安排的计划和要求于1988年编写出版的。多年来船舶操纵性与耐波性学科有相当大的进展，根据造船专业教材建设和课程教学学时缩减的要求，对原教材需要进行修订。本教材是在1988年版本基础上，根据规定的教学学时和我们多年的教学实践经验修订而成的。在修订过程中，基本保持了原有的体系，只在内容上作了些必要的删减和调整，适当补充一些新的成果应用。

第一篇船舶操纵性阐述了船舶保持或改变其运动状态的性能。本篇着重介绍船舶操纵性的基本理论和工程实用计算方法以及操纵性试验。其中第一章至第五章是船舶工程专业学生必须掌握的基本内容，第六章至第九章属于专业选修课程。

第二篇船舶耐波性阐述了船舶在风浪中的摇荡运动。本篇着重介绍船舶摇荡运动的基本理论和预报方法，了解影响摇荡运动的因素，寻找避免减轻摇荡运动的途径。本篇将原第16章“船舶耐波性理论计算”删去，在第12章中补充了部分耐波性理论计算内容。

本书由海军工程学院施生达教授担任主审。参加本书修订工作的仍为原编者：吴秀恒、张乐文、王仁康。

由于编者水平有限，书中缺点、错误在所难免，望广大读者批评指正。

编 者

于武汉交通科技大学

目 录

第一篇 船舶操纵性

绪论	1
第一章 船舶操纵运动方程	3
§ 1-1 固定坐标系	4
§ 1-2 运动坐标系	4
§ 1-3 作用于船体的水动力和力矩	7
§ 1-4 线性操纵运动微分方程	11
第二章 航向稳定性和回转性	12
§ 2-1 航向稳定性	12
§ 2-2 船舶回转性	19
§ 2-3 回转运动的耦合特性	26
第三章 船舶对操舵的响应	30
§ 3-1 操舵响应模型	30
§ 3-2 操纵性指数	33
§ 3-3 操纵性指数的物理解释	38
§ 3-4 K 、 T 指数在船舶设计中的应用	39
§ 3-5 K 、 T 指数的适用范围	41
第四章 自由自航船舶操纵性试验	42
§ 4-1 回转试验	43
§ 4-2 螺线试验与逆螺线试验	46
§ 4-3 回舵试验	47
§ 4-4 Z 形操舵试验	49
§ 4-5 航向改变试验	52
§ 4-6 自航模试验的尺度作用	54
§ 4-7 操纵性衡准	56
第五章 舵设计	57
§ 5-1 舵的类型及布置	58
§ 5-2 舵的要素和水动力特性	60
§ 5-3 舵的设计步骤	69
§ 5-4 特种舵简介	72
第六章 操纵运动非线性数学模型	78
§ 6-1 Abkowitz 非线性数学模型	78
§ 6-2 MMG 非线性数学模型	84
第七章 限制航道和风、流中的船舶操纵性	91

§ 7-1 限制航道中的船舶操纵性	91
§ 7-2 风、流中的船舶操纵性	95
第八章 作用于船体的水动力的估算	99
§ 8-1 流体惯性力的估算	99
§ 8-2 流体粘性类力的估算	105
第九章 约束模型试验	112
§ 9-1 直线拖曳试验	113
§ 9-2 旋臂试验	115
§ 9-3 平面运动机构试验	118
参考文献	122

第二篇 船舶耐波性

第十章 绪论	124
§ 10-1 研究的内容和目的	124
§ 10-2 研究的方法	126
第十一章 船舶在静水中的摇荡	127
§ 11-1 船舶在静水中的无阻力横摇	128
§ 11-2 船舶在静水中的有阻力横摇	134
§ 11-3 船舶在静水中的垂荡和纵摇	142
第十二章 船舶在规则波中的摇荡	146
§ 12-1 规则余弦波	146
§ 12-2 船舶在规则横波中的线性横摇	149
§ 12-3 非线性共振横摇角的确定	154
§ 12-4 船舶在规则迎浪中的垂荡与纵摇的耦合运动	157
§ 12-5 航向、航速对船舶摇荡的影响	164
第十三章 船舶在不规则波中的摇荡	166
§ 13-1 海浪概述	166
§ 13-2 海浪的统计分析	170
§ 13-3 海浪谱	177
§ 13-4 谱分析法	181
§ 13-5 船舶在不规则波中的线性横摇	186
§ 13-6 船舶在不规则波中的垂荡和纵摇	188
第十四章 船舶耐波性试验	189
§ 14-1 船模试验的相似条件	189
§ 14-2 静水中自由和强迫横摇试验	195
§ 14-3 船模在波浪中的运动和增阻试验	197
第十五章 减摇装置和船型对耐波性的影响	204
§ 15-1 横摇减摇装置	204
§ 15-2 船型对耐波性的影响	213
参考文献	219

第一篇 船舶操纵性

绪 论

船舶操纵性是指船舶按照驾驶者的意图保持或改变其运动状态的性能,即船舶能保持或改变其航速、航向和位置的性能。在船舶航行过程中,为了尽快到达目的地和减少燃料消耗,驾驶者总是力图使船舶以一定的速度保持直线航行,此时要求船舶具有良好的航向稳定性。当在预定的航线上发现障碍物或其他船舶时,为了避免碰撞,驾驶者需使船舶及时改变航速或航向,此时要求船舶具有良好的回转性及转首性。所以对一艘操纵性良好的船舶,应既能按驾驶者的要求方便、稳定地保持运动状态,又能按驾驶者的要求迅速、准确地改变运动状态。

关于操纵性的完整的含义,近年来仍在讨论和发展中。如:1946年戴维逊(Davidson)首先从运动稳定性理论出发,说明船舶操纵性应包括航向稳定性和回转性两个互相制约的方面,为操纵性的研究奠定了理论基础。1970年在日本召开的第二届船舶操纵性会议上,认为操纵性应包括小舵角的航向保持性、中舵角的航向机动性和大舵角的紧急规避性,认为只有同时具备这三个方面的性能,船舶才能满足驾驶者的使用要求。可见,他们都是从不同的角度出发提出问题的。

考察船舶的实际操纵过程可知,驾驶者是通过一系列操纵设备来实现对船舶的操纵的。通常驾驶者从船上的显示器得到可要求的航向(有时也包括航迹)与实际航向(或航迹)之间的差别。为纠正这一差别,驾驶者发出舵角指令,并要求操动舵轮。舵机接到舵轮指令后,转动舵,于是舵被转到某规定舵角,同时也将实际舵角值传送到显示器上,供驾驶者了解。由于舵角存在,而引起作用在船舵系统上的水动力,从而使船改变航向(或航迹),并且把船的实际航向值送至显示器,以供进一步操纵使用。可见,船舶实际的操纵过程形成了一个如图0-1所示的闭合回路,称为闭环控制。以上所述是航向改变的闭环过程。此外,还有一个速度大小改变的闭环过程。当船舶在海湾、内海或者进入泊地以及在港内系泊时,经常要相当频繁地使用主机来控制速度大小,以避免碰撞或触礁,确保航行安全。船舶实际航行过程中,驾驶者就是通过这两个闭环系统来改变船舶的运动状态的。

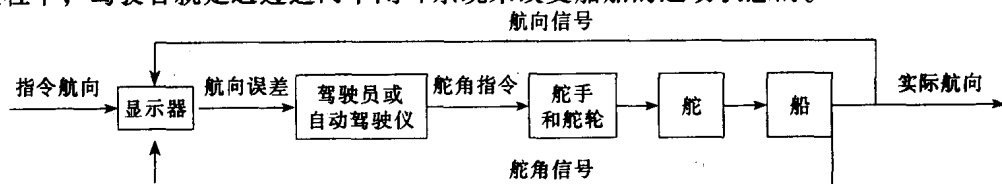


图 0-1 船舶操纵系统

在图0-1所示的操纵回路中,每一个方框都表示一个环节,每一个环节都接受输入信号,而产生相应的输出信号。各环节的特性都对整个系统性能有直接影响,所以一艘船舶操纵性的好坏,应取决于整个系统的性能,即应以闭环特性来评价。上述不同环节涉及到不同

的学科领域,在本课程中只着重讨论图 0-1 中的最后两个环节,即舵和船体的水动力特性,可称之为船舵开环系统。显然开环特性好,也有利于整个闭环特性的改善。

船舶操纵性与航行的经济性、安全性密切相关。如对海上的直航运动,若航向稳定性较好的船,就不用经常操舵即能维持航向,且航迹也较接近于要求的直线。而对航向稳定性较差的船,则要频繁操舵以纠正偏离的航向,故需经历一个曲折得多的航迹。航迹越曲折,一方面增加了实际航程,另一方面由于校正航向偏差而增加了操纵机械和推进机械的功率消耗。通常,由于上述原因而增加的功率消耗约占主机功率的 2%~3%,而对于航向稳定性较差的船甚至可高达 20%。由此可见,船舶操纵性对使用的经济性有着重要影响。据国外资料统计,每年海上失事的船舶约 200 艘,总吨位数为 120 万吨,约占世界船队的 0.4%。这相当于每 15 天失事一艘 5 万吨级的船。第 17 届国际船模试验池会议(ITTC)操纵性技术委员会报告(1984 年)中,引用美国海岸警卫队(USCG)提供的 835 起船舶碰撞、触底事故进行的统计分析表明,35% 是由于船舶操纵性欠佳而引起的。目前世界商船数量不断增长,船只数量的变化导致航行密度增大,使船舶操纵和海上航行安全问题复杂化。除数量变化外,在质量方面也发生变化。这主要是船舶尺度的增大(如超大型油船等)及航速的提高,显然驾驶这类巨轮比起普通船舶要困难和复杂得多。例如,制动 50 万吨油船,在倒车功率为正车时 50% 的情况下,需用 40min,其制动距离需 8000 米。若要以 $\pm 1^\circ$ 的精度保持航向的话,则对这样的大船,需要一个宽度为 4 倍船宽(约 200m)的航行带。而对 1500t 到 10000t 的船,只要 2 倍船宽(约 30~50m)即可。这样由于质和量的变化,增加了船舶碰撞和搁浅的危险性,即增加了海损事故,而大油船与化学品船的失事还会引起大面积海域的污染,更引起各方面的关注。国际海事组织(IMO)和一些国家正在开展制定操纵性衡准的工作,这将对船舶的航行安全性产生较大的影响。在内河航行中,由于分节驳顶推船队的出现,它的编队庞大,吃水又受限制,可看作为浅吃水的肥大船型,为保证其安全航行,对操纵性也提出了一些特殊要求,如安全过大桥、由螺旋桨与舵配合应用使分节驳船队实现横移等。由此可见,改善船舶操纵性,保证航行安全性是航行实际中提出的迫切要求。

如上所述,船舶操纵性是船舶重要航行性能之一。但是,操纵性作为一门学科在船舶原理中是发展较晚的。1912 年霍夫加特(W.Hovgaard)建立了计算船舶稳定回转直径的实用方法与图谱。1932 年库查尔斯基(W.Kucharski)发表的“关于船舶的操纵理论”一文是把船舶当作机翼来处理的首批文献之一。1938 年温布伦(G.Weinblum)把飞艇操纵理论应用到船舶操纵性研究中来,他首先建立了有效的数学研究方法。1939 年巴辛(A.M.Басин)利用里雅普诺夫(A.M.Ляпунов)的运动稳定性理论研究了船舶的航向稳定性问题。1944 年肯夫(Kemf)提出了用 Z 形操舵试验结果来评价船舶操纵性,此项工作开创了船舶对操舵的动态响应的研究。通常认为,现代船舶操纵性理论的研究,开始于 1946 年戴维逊(K.S.M.Davidson)和许夫(L.I.Schiff)的工作,他们发表的“回转和航向保持性”学术论文提出了航向稳定性和回转性的相互制约的概念,第一次给出了船舶操纵运动方程式的正确结构形式,以及表征船舶回转性和航向稳定性的指数,从而建立了船舶操纵性的线性理论。巴辛(A.M.Басин)1949 年所著“船舶航向稳定性和回转性理论”一书在这方面作出了重大贡献与发展。随后,迪德(J.Dieudonne)提出了评定船舶航向稳定性的螺旋试验方法。阿勃柯维奇(M.Abkowitz)推导了 6 个自由度内的运动方程及用泰勒级数表达非线性水动力的方法,从而为讨论船舶的非线性运动提供了有力的数学工具,为船舶操纵性理论研究作出了重大贡献。1957 年野本谦作把船舶操舵产生的操纵运动看作为一个动态响应系统,

他把分析动态系统的经典自动调节理论运用于船舶操纵性研究，在他发表的“船舶操纵特性”一文中，把转舵作为输入，船舶的运动作为输出，研究了船舶运动对操舵的频率响应，并在分析 Z 形操纵试验的基础上提出了一阶的运动响应模型和表征船舶操纵性的 K 、 T 参数。由此提出了对实船或船模作自航试验，进行物理模拟，从中求取表征船舶操纵性的特征参数，以此来判别船舶操纵性的好坏，作为操纵性衡准的指标，并且可以得到船型、舵与操纵性之间的关系，为船舶设计和改善船舶操纵性提供依据。

多年来，在应用流体力学理论计算船舶水动力学方面取得了重大进展。比较著名的有纽曼 (J.N.Newman) 的细长体理论、鲍莱 (Bolley) 等人的小展弦比机翼理论和费加耶夫斯基 (К.К.Федяевский) 的分离流理论等。由于粘性影响和船体形状的复杂，水动力的理论计算结果目前还不能达到实用所要求的精度。随着大容量、高速计算机的发展，今后可望取得更大的进展。此外，对船舶操纵性的研究也常采用约束船模试验的方法，求取操纵运动方程中的流体动力系数，借助计算机求解方程，从而预报船舶的操纵运动，这就是所谓的约束模试验加数学模型的数字模拟。近年来，操纵性预报工作发展较快，国外一些主要船舶科研机构都已备有操纵性预报程序库，为新船设计服务，同时也能配合自动驾驶仪和仿真系统的研制，以及避碰和港口设计等方面的研究工作。操纵性预报在我国国内也已广泛开展。

随着仿真技术的发展，从 70 年代起航空中使用的飞行仿真器已应用于船舶操纵性的研究中。随着船舶吨位增长、航速提高以及数量增加，对安全航行提出了更高的要求。1969 年荷兰水池吸取宇航飞行仿真器的成果，成功地研制了一台水面船舶操纵仿真器，为训练驾驶员和研究船舶操纵性开辟了一条新途径。操纵仿真器中的控制环节（即人或机）把船舶操纵运动的开环系统连接起来，形成闭环系统。此类研究对研制自动操纵系统及制订在风、浪、流、浅水及狭窄航道等条件下的操纵性指标特别有用。至今，瑞典、日本等国都相继建造了此类仿真器。我国在 1979 年也建成了一台系泊显示仿真器。仿真技术在操纵性研究中的地位在逐渐为人们所认识。

船舶操纵性研究的另一方面发展是现代控制理论中的系统辨识技术应用于船舶操纵性研究中。它利用动态系统测得的输入和输出数据，按等价原则从已知的模型类中，找出一个与该系统输出数据有最优拟合的动态系统数学模型。现代系统辨识技术可以通过费时很少的实船或自由自航模试验，来求得运动方程中的系数，起到类似于约束模试验的作用，这一点是很吸引人的。此外，系统辨识还能方便地进行在线辨识，为自动舵装置的研制提供方便。

船舶操纵装置的研究，也是操纵性研究中的重要方面之一。由于操纵装置对改善船舶操纵性有较大影响，因此能引起人们的广泛注意，我国国内对它的研究也较多，特别在内河船舶操纵装置方面。

近十多年来，船舶操纵性研究不断向新的领域发展。船舶在浅水、狭窄航道中的操纵性，在风、浪及水流作用下的船舶操纵性，两船接近或迎面航行时的操纵性，高速船舶的操纵性、肥大型船舶的操纵性以及船舶动力定位等新课题的研究，正在不断取得新的成果。

第一章 船舶操纵运动方程

水面船舶的操纵性主要研究在舵控制下，水平面内的各种操纵运动。为研究运动可采用

力学中惯用的处理方法，即选取坐标系，确定表征的运动参数，建立运动方程，这就是本章主要介绍的内容。

§ 1-1 固定坐标系

固定坐标系是固结在地球表面，不随时间而变化的，如图 1-1 所示。其中 O_0 是固定坐标系的原点，通常可选取在 $t=0$ 时刻，船舶重心 G 所在的位置。 O_0x_0 轴在静水面内，其方向通常可选取在船舶总的运动方向上。 O_0y_0 轴取为 O_0x_0 轴在静水平面内沿顺时针旋转 90° 的方向上。 O_0z_0 轴垂直于静水表面，以指向地心为正。于是 $O_0-x_0y_0z_0$ 构成一右手法则的固定坐标系。

对于水面船舶的操纵运动，可认为其运动被限制在 $x_0O_0y_0$ 水平面内，船舶的位置可用它的重心坐标 x_{0G} 、 y_{0G} 及船舶纵剖面与 O_0x_0 轴的交角 ψ 来表征。对任意时刻 t ，船舶的运动状态可用 x_{0G} 、 y_{0G} 及 ψ 随时间变化函数及其各阶导数来表征。因此，重心坐标 x_{0G} 、 y_{0G} 和首向角 ψ 可作为固定坐标系的运动特征参数。

为建立船舶在固定坐标系 $O_0-x_0y_0z_0$ 中的运动方程，可将船舶当作一个刚体，引用牛顿关于质点运动的动量和动量矩定理，可得：

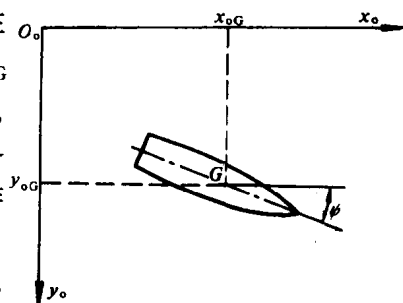


图 1-1

$$\left. \begin{aligned} X_0 &= m\ddot{x}_{0G} \\ Y_0 &= m\ddot{y}_{0G} \\ N &= I_z\ddot{\psi} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

式中：
 X_0 ——作用于船舶的外力合力沿 O_0x_0 轴分量；
 Y_0 ——作用于船舶的外力合力沿 O_0y_0 轴分量；
 N ——外力合力对通过船舶重心的铅垂轴之矩；
 m ——船舶的质量；
 I_z ——船舶质量对通过重心铅垂轴的惯性矩；

$\ddot{x}_{0G}$ 、 $\ddot{y}_{0G}$ 、 $\ddot{\psi}$ ——重心 G 点线加速度沿 O_0x_0 、 O_0y_0 轴的分量及绕 O_0z_0 轴的角加速度。

式 (1-1) 形式简单，直接描述了船舶在固定空间的运动，借此可求得船舶重心的轨迹和各时刻船舶在空间的位置。但由于其中外力 X_0 、 Y_0 除与船型有关外，还与船舶纵中剖面相对于坐标轴的方向有关，这给他们的计算带来很大的困难，故求解操纵运动通常不在此固定坐标系内进行，而采用运动坐标系。

§ 1-2 运动坐标系

运动坐标系固结在船体上，随船一起运动，如图 1-2 所示。

O 点为动坐标系原点，通常 O 点取在船舶重心或船中剖面处， Ox 轴取为船纵轴，以指向船首为正； Oy 轴与纵剖面垂直，以指向右舷为正； Oz 轴垂直于水线面，以指向龙骨为正，这样就组成一个固结在船体上的右手坐标系。

若设运动坐标系原点 O 与船舶重心 G 相重合, 则在动坐标 $G-xyz$ 中, 重心 G 点的速度为 V (显然 V 总与其轨迹相切), 速度 V 与 Ox 轴正方向的夹角 β 称之为漂角, 定义图 1-2 所示 β 为负值。速度 V 在动坐标系中的分速度 u 、 v 分别为:

$$\left. \begin{aligned} u &= |V| \cdot \cos \beta \\ v &= -|V| \cdot \sin \beta \end{aligned} \right\} \quad (1-2)$$

在操纵运动过程中, 对 G 点 (或 Oz 轴) 回转的角速度为 r , 则:

$$r = \frac{d\psi}{dt} \quad (1-3)$$

船舶在舵控制下, 于水平面内作操纵运动时, 重心 G 的速度 (u 、 v) 及对 G 的回转角速度 r 是表征其操纵运动的运动参数。一般说来, G 点的运动轨迹是水平面 $x_0o_0y_0$ 上的平面曲线, 其曲率半径 R 是个变量, 只是当舵角保持常数, 船舶进入定常回转运动时, R 才变为常数。定义舵与 Ox 轴之间的夹角为舵角 δ , 重心瞬时速度矢量与 O_0x_0 轴之间的夹角称之为航速角, 如图 1-2 所示, 并设图示角度为正。在图 1-2 上也示出了船舶与重心轨迹的相对位置。显然

$$\psi = \psi_0 + \beta \quad (1-4)$$

如图 1-3 所示, 船舶重心 G 在 dt 时间内, 由 G_1 处移至 G_2 , 所走过的路程为 $\widehat{G_1G_2}$, 则:

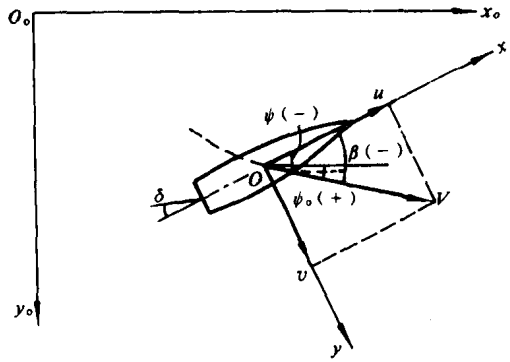


图 1-2

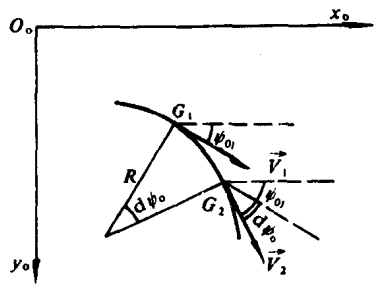


图 1-3

又有:

$$\widehat{G_1G_2} = V \cdot dt$$

$$\widehat{G_1G_2} = R \cdot d\psi_0$$

故

$$V \cdot dt = R \cdot d\psi_0$$

即

$$\frac{d\psi_0}{dt} = \frac{V}{R}$$

船舶的回转角速度 r 可表为:

$$r = \frac{d\psi}{dt} = \frac{d\psi_0}{dt} + \frac{d\beta}{dt} = \frac{V}{R} + \frac{d\beta}{dt}$$

当船舶在定常回转时, $\frac{d\beta}{dt} = 0$, 则有:

$$r = \frac{V}{R} \quad (1-5)$$

以上简叙了运动参数之间的关系。

下面进一步分析作用在船体上的外力与速度。设合力在动坐标系的分量为 X 、 Y 、在固定坐标系的分量为 X_o 、 Y_o ，则由二坐标系间的几何关系可知：

$$\left. \begin{aligned} X &= X_o \cos \psi + Y_o \sin \psi \\ Y &= Y_o \cos \psi - X_o \sin \psi \end{aligned} \right\} \quad (1-6)$$

同理，两坐标系速度分量之间的关系：

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_{oG} &= u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y}_{oG} &= u \sin \psi + v \cos \psi \end{aligned} \right\} \quad (1-7)$$

式中： u 、 v —— G 点速度在动坐标系的分量；

$\dot{x}_{oG}$ 、 $\dot{y}_{oG}$ —— G 点速度在固定坐标系的分量；

“.”——表示对时间的微分。

将式 (1-7) 二边对时间微分，则得：

$$\left. \begin{aligned} \ddot{x}_{oG} &= \dot{u} \cos \psi - \dot{v} \sin \psi - (u \sin \psi + v \cos \psi) \dot{\psi} \\ \ddot{y}_{oG} &= \dot{u} \sin \psi + \dot{v} \cos \psi + (u \cos \psi - v \sin \psi) \dot{\psi} \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

将式 (1-8) 代入式 (1-1)，并注意到式 (1-6)，则得：

$$\left. \begin{aligned} X &= m (\dot{u} - v \dot{\psi}) \\ Y &= m (\dot{v} + u \dot{\psi}) \end{aligned} \right\}$$

考虑到船舶在水平面操纵运动，此两个坐标系在 z 轴方向并无变化，故绕 G 点的力矩方程不改变，仍为：

$$N = I_z \ddot{\psi}$$

以上，我们利用了动坐标和固定坐标系二者之间的关系，推导了动坐标原点 O 与 G 重合时，即 $G-xyz$ 中之操纵运动一般方程：

$$\left. \begin{aligned} X &= m (\dot{u} - v \dot{\psi}) \\ Y &= m (\dot{v} + u \dot{\psi}) \\ N &= I_z \ddot{\psi} \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

将方程组 (1-9) 与 (1-1) 相比，多了 $m v \dot{\psi}$ 和 $m u \dot{\psi}$ 两项，可理解为由于坐标系运动的向心力。式 (1-9) 是动坐标系原点取在重心点上的水平面内操纵运动一般方程。考虑到重心在航行过程中是变化的，并不一定是已知的固定位置。又考虑到船舶对称性，若将动坐标原点 O 取在船中剖面处，可使流体惯性力计算简化。因此，在操纵性研究中，也普遍采用原点 O 位于船中剖面处的 $O-xyz$ 坐标系。根据 O 点与 G 点物理量间的关系，可从式 (1-9) 推出 $O-xyz$ 系中的运动方程。

设 G 点在 $O-xyz$ 中的坐标为 (x_G, o, o) ，并将式 (1-9) 中 u 、 v 理解为重心 G 点之值，以 u_G 、 v_G 来区别之，则 G 点与 O 点之速度关系为：

$$\left. \begin{aligned} u &= u_G \\ v &= v_G - x_G \dot{\psi} \end{aligned} \right\} \quad (1-10)$$

式中： u 、 v —— O 点速度之动坐标系分量；

$x_G \cdot \dot{\psi}$ ——动坐标系旋转而引起的牵连速度。在式 (1-9) 中 N 为对重心 G 之力矩，

现以 N_G 表之，则对 O 点之矩：

$$N = N_G + m (\dot{v}_G + u_G \dot{\psi}) x_G \quad (1-11)$$

船体惯性矩由移轴定理得:

$$I_z = I_{xG} + mx_G^2 \quad (1-12)$$

将式 (1-10)、(1-11) 和 (1-12) 代入方程组 (1-9), 则得:

$$\left. \begin{aligned} X &= m (\dot{u} - v\dot{\psi} - x_G\dot{\psi}^2) \\ Y &= m (\dot{v} + u\dot{\psi} + x_G\ddot{\psi}) \\ N &= I_z\ddot{\psi} + mx_G (\dot{v} + u\dot{\psi}) \end{aligned} \right\} \quad (1-13)$$

式 (1-9) 和 (1-13) 都是船舶在水平面内操纵运动一般方程, 是我们分析船舶操纵运动的出发点。显然式 (1-9) 是式 (1-13) 当 $x_G=0$ 的特例。如果我们进一步确定作用在船体上的流体水动力 X 、 Y 、 N 的表达式, 则就可得到供操纵性计算的数学模型。若将水动力表达式取为线性表达式, 则组成的数学模型为线性模型, 若取为非线性表达式, 则就得到非线性数学模型。

§ 1-3 作用于船体的水动力和力矩

一般说来, 作用于船体的水动力、力矩将与其本身几何形状有关 (可以船长 L 、质量 m 、转动惯量 I_z 、船型参数等表征。), 与船体运动特性有关 (如: u 、 v 、 r 、 $\dot{u}$ 、 $\dot{v}$ 、 $\dot{r}$ 、螺旋桨转速 n 、 $\dot{n}$ 、舵角 δ 、 $\dot{\delta}$ 等参数), 也与流体本身特性有关 (如: 流体密度 ρ 、运动粘性系数 μ 、重力加速度 g 、表面张力系数 τ 、大气压 p 、饱和蒸汽压 p_v 、流体弹性模数 E 等)。可以如下函数关系来表征:

$$\begin{array}{c} X \\ Y = f \left(\underbrace{L, m, I_z, x_G, \text{船型参数}}_{\text{船体几何特征}}; \underbrace{u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, n, \dot{n}, \delta, \dot{\delta}}_{\text{船体运动特性}}; \underbrace{\rho, \mu, g, \tau, p, p_v, \dots}_{\text{流体特性}} \right) \\ N \end{array}$$

显然, 以上函数关系并没有包含影响流体动力、力矩的全部因素。如研究在限制航道中的操纵性问题, 则还应包括岸、底干扰力。对在波浪上的操纵性问题, 则还将涉及波浪扰动力等。现我们仅考虑对某一给定的船型、在给定的流体中运动的情况。由上式可得:

$$\begin{aligned} X &= X(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, n, \dot{n}, \delta, \dot{\delta}) \\ Y &= Y(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, n, \dot{n}, \delta, \dot{\delta}) \\ N &= N(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, n, \dot{n}, \delta, \dot{\delta}) \end{aligned}$$

在以上表达式中, 我们可以认为船舶在水平面内的操纵运动是缓变的, 所以相应的流体动力只与当时的运动状态量有关, 而不考虑运动的整个历史过程的影响。且认为高阶导数与加速度相比是高阶小量, 可以忽略。这些都是对缓变运动的一种近似处理。

为进一步简化问题, 常忽略操纵运动过程中推进器转速这一因素的作用, 即作为对某特定工作状态而言。并且考虑到操舵过程短暂, 故 $\dot{\delta}$ 影响不大, 可予忽略。则可得通常的水动力关系式为

$$\left. \begin{aligned} X &= X(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, \delta) \\ Y &= Y(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, \delta) \\ N &= N(u, v, r, \dot{u}, \dot{v}, \dot{r}, \delta) \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

进一步对式 (1-14) 按泰勒级数展开, 以求得水动力、力矩的解析表达式。

对于单变量 x 的函数 $f(x)$, 如果在 $x=x_1$ 点处, $f(x)$ 的各阶导数皆连续, 则 x_1

邻域中任何 x 处的值可以 x_1 处之值来表征, 即

$$f(x) = f(x_1) + \Delta x \cdot \frac{df(x_1)}{dx} + \frac{\Delta x^2}{2!} \cdot \frac{d^2f(x_1)}{dx^2} + \frac{\Delta x^3}{3!} \cdot \frac{d^3f(x_1)}{dx^3} + \dots + \frac{\Delta x^n}{n!} \cdot \frac{d^n f(x_1)}{dx^n} + \dots \quad (1-15)$$

式中: $f(x)$ —— x_1 邻域中任意 x 处的函数值;

$f(x_1)$ —— x_1 处函数值;

$\frac{d^n f(x_1)}{dx^n}$ —— 在 $x = x_1$ 处 n 阶导数之值。

若 x 点偏离 x_1 点不远, 即 Δx 是个足够小量, 忽略式 (1-15) 中高阶项, 则得

$$f(x) = f(x_1) + \Delta x \cdot \frac{df(x_1)}{dx} \quad (1-16)$$

式 (1-16) 即为函数 $f(x)$ 在 x_1 处泰勒展开线性表达式。可见, 用泰勒级数展开需确定展开点, 若计算点与展开点越接近, 则采用线性化表达式就越能取得较高的精度。

操纵运动的流体动力表达式 (1-14) 是个多元函数关系, 所以需采用多元函数的泰勒级数展开, 与单元情况类同, 将式 (1-14) 表示为:

$$\left. \begin{aligned} X &= X(u_1, v_1, r_1, \dot{u}_1, \dot{v}_1, \dot{r}_1, \delta_1) + \frac{\partial X}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial X}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial X}{\partial r} \Delta r \\ &\quad + \frac{\partial X}{\partial \dot{u}} \Delta \dot{u} + \frac{\partial X}{\partial \dot{v}} \Delta \dot{v} + \frac{\partial X}{\partial \dot{r}} \Delta \dot{r} + \frac{\partial X}{\partial \delta} \Delta \delta + \dots + \frac{1}{n!} \left(\frac{\partial}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial}{\partial v} \Delta v \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial}{\partial r} \Delta r + \frac{\partial}{\partial \dot{u}} \Delta \dot{u} + \frac{\partial}{\partial \dot{v}} \Delta \dot{v} + \frac{\partial}{\partial \dot{r}} \Delta \dot{r} + \frac{\partial}{\partial \delta} \Delta \delta \right)^n \cdot X + \dots \\ Y &= Y(u_1, v_1, r_1, \dot{u}_1, \dot{v}_1, \dot{r}_1, \delta_1) + \frac{\partial Y}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial Y}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial Y}{\partial r} \Delta r \\ &\quad + \frac{\partial Y}{\partial \dot{u}} \Delta \dot{u} + \frac{\partial Y}{\partial \dot{v}} \Delta \dot{v} + \frac{\partial Y}{\partial \dot{r}} \Delta \dot{r} + \frac{\partial Y}{\partial \delta} \Delta \delta + \dots + \frac{1}{n!} \left(\frac{\partial}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial}{\partial v} \Delta v \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial}{\partial r} \Delta r + \frac{\partial}{\partial \dot{u}} \Delta \dot{u} + \frac{\partial}{\partial \dot{v}} \Delta \dot{v} + \frac{\partial}{\partial \dot{r}} \Delta \dot{r} + \frac{\partial}{\partial \delta} \Delta \delta \right)^n \cdot Y + \dots \\ N &= N(u_1, v_1, r_1, \dot{u}_1, \dot{v}_1, \dot{r}_1, \delta_1) + \frac{\partial N}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial N}{\partial v} \Delta v + \frac{\partial N}{\partial r} \Delta r \\ &\quad + \frac{\partial N}{\partial \dot{u}} \Delta \dot{u} + \frac{\partial N}{\partial \dot{v}} \Delta \dot{v} + \frac{\partial N}{\partial \dot{r}} \Delta \dot{r} + \frac{\partial N}{\partial \delta} \Delta \delta + \dots + \frac{1}{n!} \left(\frac{\partial}{\partial u} \Delta u + \frac{\partial}{\partial v} \Delta v \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial}{\partial r} \Delta r + \frac{\partial}{\partial \dot{u}} \Delta \dot{u} + \frac{\partial}{\partial \dot{v}} \Delta \dot{v} + \frac{\partial}{\partial \dot{r}} \Delta \dot{r} + \frac{\partial}{\partial \delta} \Delta \delta \right)^n \cdot N + \dots \end{aligned} \right\} \quad (1-17)$$

式中: $X(u_1, v_1, r_1, \dot{u}_1, \dot{v}_1, \dot{r}_1, \delta_1)$ 、 $Y(u_1, v_1, r_1, \dot{u}_1, \dot{v}_1, \dot{r}_1, \delta_1)$ 、 $N(u_1, v_1, r_1, \dot{u}_1, \dot{v}_1, \dot{r}_1, \delta_1)$ 分别为展开点 $(u_1, v_1, r_1, \dot{u}_1, \dot{v}_1, \dot{r}_1, \delta_1)$ 处的函数值;

$$\left. \begin{aligned} \Delta u &= u - u_1 & \Delta v &= v - v_1 & \Delta r &= r - r_1 \\ \Delta \dot{u} &= \dot{u} - \dot{u}_1 & \Delta \dot{v} &= \dot{v} - \dot{v}_1 & \Delta \dot{r} &= \dot{r} - \dot{r}_1 \\ \Delta \delta &= \delta - \delta_1 \end{aligned} \right\} \quad (1-18)$$

式 (1-17) 中各阶导数都取展开点之值。

在船舶操纵性研究中, 如选取舵位于中间位置 ($\delta = 0$), 船以匀速沿其中纵中剖面方向的定常直线运动状态为初始状态, 即为泰勒级数的展开点, 则:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \text{const} \\ v_1 = r_1 = \dot{u}_1 = \dot{v}_1 = \dot{r}_1 = \delta_1 &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1-19)$$

若所计算状态的流体动力、力矩与展开点状态愈接近，则只需取式 (1-17) 中的线性项就能得到足够的精确度，此时线性表达式为：

$$\left. \begin{aligned} X &= X(u_1) + X_u \Delta u + X_v \Delta v + X_r \Delta r + X_{\dot{u}} \Delta \dot{u} + X_{\dot{v}} \Delta \dot{v} + X_{\dot{r}} \Delta \dot{r} + X_{\delta} \delta \\ Y &= Y(u_1) + Y_u \Delta u + Y_v \Delta v + Y_r \Delta r + Y_{\dot{u}} \Delta \dot{u} + Y_{\dot{v}} \Delta \dot{v} + Y_{\dot{r}} \Delta \dot{r} + Y_{\delta} \delta \\ N &= N(u_1) + N_u \Delta u + N_v \Delta v + N_r \Delta r + N_{\dot{u}} \Delta \dot{u} + N_{\dot{v}} \Delta \dot{v} + N_{\dot{r}} \Delta \dot{r} + N_{\delta} \delta \end{aligned} \right\} \quad (1-20)$$

式 (1-20) 中采用了一系列的简化写法，如 $X_u = \frac{\partial X}{\partial u}$ ， $Y_r = \frac{\partial Y}{\partial r}$...，统称为水动力导数。式 (1-20) 中的线性水动力导数分别表示为船舶作匀速直线运动，只改变某一运动参数，而其他参数皆不变时，所引起的作用于船舶的水动力（或力矩）对该运动参数的变化率。

对式 (1-20) 考虑到泰勒级数的展开点对应于匀速直线运动，此时船舶运动左右对称，无横向力，故 $Y(u_1) = 0$ ， $N(u_1) = 0$ 。为保持匀速直线运动，X 方向的受力应使螺旋桨的推力与船体阻力相平衡，故 $X(u_1) = 0$ 。再考虑到船体几何形状左右对称，X 方向速度、加速度的变化不会引起侧向力和偏航力矩，即 $Y_u = Y_{\dot{u}} = N_u = N_{\dot{u}} = 0$ 。横向运动参数 v 、 $\dot{v}$ 、 r 、 $\dot{r}$ 、 δ 的变化对 X 方向水动力的影响应具有对称性，即 X 可表示为 v 、 $\dot{v}$ 、 r 、 $\dot{r}$ 、 δ 的偶函数，以使原点处的一阶偏导数为零，如图 1-4 所示，即

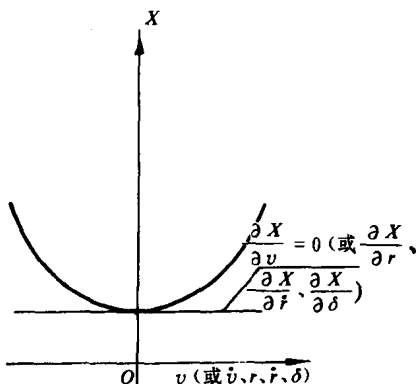


图 1-4

$$X_v = X_{\dot{v}} = X_r = X_{\dot{r}} = X_{\delta} = 0$$

且注意到

$$\begin{aligned} \Delta u &= u - u_1 & \Delta \dot{u} &= \dot{u} \\ \Delta v &= v & \Delta \dot{v} &= \dot{v} \\ \Delta r &= r & \Delta \dot{r} &= \dot{r} \\ \Delta \delta &= \delta \end{aligned}$$

基于上述简化，式 (1-20) 可表示为：

$$\left. \begin{aligned} X &= X_u \Delta u + X_{\dot{u}} \Delta \dot{u} \\ Y &= Y_v v + Y_{\dot{v}} \dot{v} + Y_r r + Y_{\dot{r}} \dot{r} + Y_{\delta} \delta \\ N &= N_v v + N_{\dot{v}} \dot{v} + N_r r + N_{\dot{r}} \dot{r} + N_{\delta} \delta \end{aligned} \right\} \quad (1-21)$$

式 (1-21) 即为水动力、力矩的线性表达式。显然所计算的状态与沿纵向的匀速直线运动偏离越小，式 (1-21) 计算的精度就越高。当运动参数变化较大时，为保持一定的精度，还需引入某些非线性导数项。这也是构成非线性数学模型的依据所在。

式 (1-21) 中包含了很多水动力导数。通常可称对线速度分量 u 的导数为线性速度导数，如： X_u 等。对横向速度分量 v 的导数为位置导数，如： Y_v 、 N_v 等。对回转角速度 r 的导数为旋转导数，如： N_r 、 Y_r 等。对各加速度分量和角加速度分量的导数为加速度导数，如： $X_{\dot{u}}$ 、 $Y_{\dot{v}}$ 、 $Y_{\dot{r}}$ 、 $N_{\dot{v}}$ 、 $N_{\dot{r}}$ 等。对舵角 δ 的导数为控制导数，如： Y_{δ} 等。式 (1-21)

表明，操纵运动的船体所受到的流体水动力、力矩可基于各水动力导数来估算。显然，对不同的船体几何形状相应各导数值是不同的，故船舶不同的操纵性可通过其不同的导数值来表征。

在船舶操纵性的试验和计算中，为便于试验结果推广及比较，也常将水动力、力矩采用无因次化的形式、分别将表示力因次的特征量 $\frac{1}{2}\rho V^2 L^2$ 和力矩因次的特征量 $\frac{1}{2}\rho V^2 L^3$ 去除式 (1-21) 的两边，则得：

$$\left. \begin{aligned} \frac{X}{\frac{1}{2}\rho V^2 L^2} &= \frac{X_u}{\frac{1}{2}\rho V L^2} \frac{\Delta u}{V} + \frac{X_{\dot{u}}}{\frac{1}{2}\rho L^3 V^2/L} \frac{\dot{u}}{V} \\ \frac{Y}{\frac{1}{2}\rho V^2 L^2} &= \frac{Y_v}{\frac{1}{2}\rho V L^2} \frac{v}{V} + \frac{Y_{\dot{v}}}{\frac{1}{2}\rho L^3 V^2/L} \frac{\dot{v}}{V} + \frac{Y_r}{\frac{1}{2}\rho V L^3} \frac{rL}{V} \\ &\quad + \frac{Y_{\dot{r}}}{\frac{1}{2}\rho L^4 V^2} \frac{\dot{r}L^2}{V^2} + \frac{Y_{\delta}}{\frac{1}{2}\rho V^2 L^2} \delta \\ \frac{N}{\frac{1}{2}\rho V^2 L^3} &= \frac{N_v}{\frac{1}{2}\rho V L^3} \frac{v}{V} + \frac{N_{\dot{v}}}{\frac{1}{2}\rho V L^4 V^2} \frac{\dot{v}L}{V} + \frac{N_r}{\frac{1}{2}\rho V L^4} \frac{rL}{V} \\ &\quad + \frac{N_{\dot{r}}}{\frac{1}{2}\rho L^5 V^2} \frac{\dot{r}L^2}{V^2} + \frac{N_{\delta}}{\frac{1}{2}\rho V^2 L^3} \delta \end{aligned} \right\} \quad (1-22)$$

式中：L——船长；

ρ ——流体的密度；

V——船舶的特征速度。

将式 (1-22) 表示为：

$$\left. \begin{aligned} X' &= X_u \Delta u' + X_{\dot{u}} \dot{u}' \\ Y' &= Y_v v' + Y_{\dot{v}} \dot{v}' + Y_r r' + Y_{\dot{r}} \dot{r}' + Y_{\delta} \delta' \\ N' &= N_v v' + N_{\dot{v}} \dot{v}' + N_r r' + N_{\dot{r}} \dot{r}' + N_{\delta} \delta' \end{aligned} \right\} \quad (1-23)$$

其中：“'”表示无因次化符号。

显然相应的无因次水动力导数为：

$$\begin{aligned} X'_u &= \frac{X_u}{\frac{1}{2}\rho V L^2} & X'_{\dot{u}} &= \frac{X_{\dot{u}}}{\frac{1}{2}\rho L^3} \\ Y'_v &= \frac{Y_v}{\frac{1}{2}\rho V L^2} & Y'_{\dot{v}} &= \frac{Y_{\dot{v}}}{\frac{1}{2}\rho L^3} \\ Y'_r &= \frac{Y_r}{\frac{1}{2}\rho V L^3} & Y'_{\dot{r}} &= \frac{Y_{\dot{r}}}{\frac{1}{2}\rho L^4} \\ N'_v &= \frac{N_v}{\frac{1}{2}\rho V L^3} & N'_{\dot{v}} &= \frac{N_{\dot{v}}}{\frac{1}{2}\rho L^4} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} N_r' &= \frac{N_r}{\frac{1}{2}\rho L^4} & N_i' &= \frac{N_i}{\frac{1}{2}\rho L^5} \\ Y_\delta' &= \frac{Y_\delta}{\frac{1}{2}\rho V^2 L^2} & N_\delta' &= \frac{N_\delta}{\frac{1}{2}\rho V^2 L^3} \end{aligned}$$

此外，相应的无因次运动参数：

$$\begin{aligned} \Delta u' &= \frac{\Delta u}{V} & \dot{u}' &= \frac{\dot{u}L}{V^2} & v' &= \frac{v}{V} \\ \dot{v}' &= \frac{\dot{v}L}{V^2} & r' &= \frac{rL}{V} & \dot{r}' &= \frac{\dot{r}L^2}{V^2} \end{aligned}$$

以上所述，是船舶操纵中通常采用的计算水动力的处理方法之一。也可将总的流体水动力、力矩按其成因分为流体惯性力和流体粘性力两部分。流体惯性力表示船体在理想流体中加速运动时受到的力，可采用势流理论求解，最后可将流体惯性力以附连水质量（惯矩）等来估算。流体粘性力表示船体在真实流体中作定常运动时的受力，应是 u 、 v 、 r 、 δ 等的函数关系，对此再采用泰勒级数展开。所以，在这两种不同的分析方法中，加速度、角加速度导数对应于附连水质量（惯矩）。

§ 1-4 线性操纵运动微分方程

我们已推得了船舶在水平面操纵运动的一般方程 (1-13)，同时也求得了水动力的线性表达式 (1-21)。为求得线性操纵运动微分方程，首先需将式 (1-13) 右端进行线性化。仍选取沿船舶纵向的匀速直线运动为初始状态，

$$\begin{aligned} m (\dot{u} - \phi v - x_G \dot{\phi}^2) \\ &= m (\dot{u} - rv - x_G r^2) \\ &= m [(\dot{u}_1 + \Delta \dot{u}_1) - (r_1 + \Delta r)(v_1 + \Delta v) - x_G (r_1 + \Delta r)^2] \end{aligned}$$

将式 (1-18) 和 (1-19) 代入上式，略去二阶以上的小量，则得：

$$\begin{aligned} m (\dot{u} - rv - x_G r^2) &\doteq m \dot{u} \\ \text{同理可推得：} \quad m (\dot{v} + ru + x_G \dot{r}) &= m (\dot{v} + ru_1 + x_G \dot{r}) \\ I_z \dot{r} + mx_G (\dot{v} + ru) &\doteq I_z \dot{r} + mx_G (\dot{v} + ru_1) \end{aligned} \quad (1-24)$$

将式 (1-21) 和 (1-24) 代入式 (1-13)，则可得线性化的船舶操纵运动微分方程组：

$$\left. \begin{aligned} -X_u (u - u_1) + (m - X_{\dot{u}}) \dot{u} &= 0 \\ -Y_v v + (m - Y_{\dot{v}}) \dot{v} - (Y_r - mu_1) r - (Y_{\dot{r}} - mx_G) \dot{r} &= Y_\delta \delta \\ -N_v v - (N_{\dot{v}} - mx_G) \dot{v} - (N_r - mx_G u_1) r + (I_z - N_{\dot{r}}) \dot{r} &= N_\delta \delta \end{aligned} \right\} \quad (1-25)$$

可见式 (1-25) 中第一式与后二式无关，可为一独立方程，而且在线性理论中 $u \approx u_1$ ，故通常可忽略之，线性微分方程组变为：

$$\left. \begin{aligned} (m - Y_{\dot{v}}) \dot{v} - Y_v v + (mx_G - Y_{\dot{r}}) \dot{r} + (mu_1 - Y_r) r &= Y_\delta \delta \\ (mx_G - N_{\dot{v}}) \dot{v} - N_v v + (I_z - N_{\dot{r}}) \dot{r} + (mx_G u_1 - N_r) r &= N_\delta \delta \end{aligned} \right\} \quad (1-26)$$

将式 (1-25) 无因次化，相应的无因次方程组为：