

[法] BERNARD MOLIN 著

A photograph of an offshore oil rig at sea, viewed from a low angle. The rig is a complex structure of steel beams and platforms, with a large crane extending from the top. The sky is a deep blue with some white clouds, and the sea is visible in the foreground. The overall tone is blue and industrial.

HYDRODYNAMIQUE  
DES STRUCTURES  
OFFSHORE  
海洋工程水动力学

刘水庚 译  
颜开 陈晓波 孙伯起 校



国防工业出版社  
National Defense Industry Press

本书由总装备部装备科技译著出版基金资助出版

HYDRODYNAMIQUE DES STRUCTURES OFFSHORE

# 海洋工程水动力学

[法] BERNARD MOLIN 著

刘水庚 译

颜开 陈晓波 孙伯起 校

国防工业出版社

北京

著作权合同登记 图字:军—2010—017 号

图书在版编目(CIP)数据

海洋工程水动力学 / (法)莫兰著;刘水庚译. —北京:国防工业出版社,2012.1

ISBN 978 - 7 - 118 - 06785 - 9

I. ①海... II. ①莫... ②刘... III. ①海洋工程-水动力学 IV. ①P75

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 065878 号

© Editions Technip, Paris, 2002.

*Imprimé en France*

ISBN 2 - 7108 - 0815 - 3

All Rights Reserved

Authorised Translation from French language editon published by Editions Technip

本书简体中文版由 Editions Technip 授权国防工业出版社独家出版发行。

版权所有,侵权必究。

※

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 100048)

北京嘉恒彩色印刷有限责任公司

新华书店经售

\*

开本 710 × 960 1/16 印张 22 字数 412 千字

2012 年 1 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—2000 册 定价 88.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777

发行邮购:(010)88540776

发行传真:(010)88540755

发行业务:(010)88540717

# 序 言

法国马赛高等工程师学校贝尔纳·莫兰(Bernard MOLIN)教授是在海洋工程领域享有较高国际知名度的专家。他长期从事海洋工程结构物的水动力学研究工作,并颇有建树。我在2003年访问法国时,经法国船级社水动力专家陈晓波博士的介绍,有幸对莫兰教授的著作《海洋工程水动力学》有了初步的了解,书中对海洋工程水动力学有不少独到的见解和阐述。于是,我在2004年特别邀请他到国内来讲学。通过交流、讨论发现:莫兰教授是在积累了几十年的研究成果的基础上撰写了这本书。该书系统地阐述了海洋工程水动力学领域最近的研究成果,尤其是深入地介绍了法国的研究工作进展和成果。该书既有深入的理论探讨,又有很好的实用价值。2005年,我积极推荐,请中国船舶科学研究中心组织翻译该书,并由国防工业出版社出版。

现该书的翻译和译校工作均已完成,即将付梓,这是值得高兴的一件事情。现代海洋技术不断发展和进步,海洋开发的范围不断扩大和推进,因此深入掌握各种海上结构物,尤其是深水海洋工程结构物的设计,准确作出各种特性预报,无疑是十分需要的。《海洋工程水动力学》一书的翻译和出版将为国内从事海洋工程水动力学研究的学者、工程设计人员和研究生提供一本很好的参考书。读者将会发现,书中观点明确,思路清晰,涉及的问题由浅入深,由局部到整体,娓娓道来,引人入胜。希望本书的出版能够促进和加快我国海洋工程水动力学的发展。

吴有生

# 前 言

建设海洋强国是国家的发展战略。由于海洋勘探和采油领域技术的进步,对辽阔的海洋资源的研究与开发已成为可能。现在海洋开发技术随近海、深海和超深海而发生深刻变化,了解和掌握海上结构物设计、建造以及各种环境对其特性的影响和预报是十分有用的。

法国贝尔纳·莫兰教授撰写的《海洋工程水动力学》一书,凝聚了他几十年之学术积累,系统地总结了国外学者在海洋工程水动力学研究领域的研究方法和研究成果,尤其是法国在该领域的研究成果。此书在法国广受好评,成为高校、研究所和工业部门的重要参考资料。

由于该书对海洋工程的教学、研究和设计都具有很高的参考价值,译成中文并在中国出版,将有利于我国海洋工程技术的研究和发展。这本书的写法有其独到之处。先讨论所谓小尺度物体,即缆索、柱体一类的波浪载荷和涡激振动等问题,再讨论大型海洋工程结构物,即海洋平台一类的波浪载荷和响应问题。针对大型物体,先讨论线性问题,再讨论二阶效应,最后论述其他高阶效应。思路十分清晰,可读性很强。书中对今后应进一步研究的问题也一一指出,便于读者掌握发展动态。这本书的翻译出版对国内从事海洋工程水动力学的学者、工程设计人员和在校研究生都有很大的参考价值。

本书是在吴有生院士的极力推荐和 702 所前任所长崔维成研究员以及现任所长翁震平研究员的积极支持下,由颜开副所长组织实施翻译工作的。本书的翻译出版得到了贝尔纳·莫兰教授本人和他以前的学生陈晓波博士的大力支持,并得到了该书法文版的出版社——法国 TECHNIP 的版权许可。全书的文字翻译工作由刘水庚译审完成,颜开研究员对符号表、第 1 章~第 4 章以及附录进行了译文校对,陈晓波博士对第 5 章~第 8 章进行了文字校对并对全书的文字进行了复核。孙伯起研究员承担了全书的技术审校工作,胡启庸研究员对本书第 8 章进行了技术审校。全书的文字录入工作由刘凤英承担。最后,哈尔滨工程大学段文洋教授的研究团队和大连理工大学吕林博士对全文进行了最后校订。此外,本书的翻译还得到了上海交通大学李润培教授和 702 所缪泉明研究员的大力支持。在此向关心和支持本书翻译出版工作的各位领导和专家表示衷心的感谢,向承担打字、技术

校对、文字校对的所有人员致以深切的谢意。

本书在组织翻译、获得版权许可等方面获得了中国船舶科学研究中心、法国船级社(Bureau Veritas)、哈尔滨工程大学深海工程研究中心等单位在经费上的大力支持,在此表示衷心的感谢。

译者

2010年6月5日

# FOREWORD

I am very much pleased and honored that this Chinese version of my book has finally come out.

I am very much indebted to Dr. Chen Xiaobo, from Bureau Veritas, who was the initiator of this translation, and who pushed it through its end with much enthusiasm and persistence. My gratitude also goes to Professors Wu Yousheng and Yan Kai, from CSSRC, who supported this enterprise from its very beginning. Thanks are extended to DERC of Harbin Engineering University, BV and CSSRC for their financial supports.

I am most grateful to my translator, Dr. Liu Shuigeng.

Now my wishes are that Chinese students and engineers will find the contents of this book helpful in their work.

Bernard MOLIN

2010 – 12

# 原 序

由于海洋勘探和生产领域技术的进步,辽阔的近海海域资源的研究与开采已成为可能。年复一年,人们接受新的挑战,充分发挥无穷的想象力,绘制了高效、经济上可承受的、遵循环境保护要求的发展蓝图。现在,海洋开发已从近海向深海和超深海发展。

这些成就是依托从事海上建筑物特性研究的学术界,通过研究中心、石油公司和与石油有关的公司开展的研究、开发与论证工作获得的。海上建筑物研究活动俱乐部(CLAROM)是交流与分享海上建筑物经验的论坛,自成立伊始,便十分重视文献资料的出版,将海上建筑物设计和建造,以及在各种环境要素作用下,海洋建筑物特性预报研究发展动态及时提供给工业部门。

贝尔纳·莫兰的著作是在 CLAROM 框架内编辑的“海上建筑物实用指南”丛书中最新增加的一卷,它深入论述了针对所有近海工程计算的水动力学问题。

我对作者基于近年来完成的工程所进行的综述工作致以崇高的敬意。该项工作特别包括了在 CLAROM 支持下协作完成的项目成果,其工业目标是明确的:在借助水池和开阔水域内进行物理模型试验,深入了解物理现象的基础上,促进海上建筑物尺度确定方法和其特性数值模拟的发展。

贝尔纳·莫兰对解决本著作中论述的问题作出了重要的贡献。他是法国大都市中致力于海洋工程研究的一位杰出而活跃的分子,得到高度评价的教师,是将实用指南严肃认真地介绍给读者并供人们使用的理想作者。

雅克·比尔热 于法国石油研究所



## 致 谢

受 CLAROM 的委托,由我负责编写这本“实用指南”。我要感谢该俱乐部主席雅克·比尔热(Jacques Burger),在他任职期间(1996年—2001年)为完成此项任务自始至终给予我信任和鼓励。

我要感谢所有有关水动力学的 CLAROM 项目的作者。本书论述的许多成果均引自这些项目。在这些项目中,可以特别列举下列几项:

- 动力转塔(“Dynatour”,1988年—1990年)。
- 缓慢漂移运动的阻尼(1991年—1994年)。
- 深海(1992年—1995年)。
- 单塔式平台和张力腿平台的高频谐振(1993年—1995年)。
- 水池和数值模型中产生的波浪(1996年—1999年)。
- 浮式采油结构附近波浪巨大升高的效应(1996年—1999年)。
- 波峰内的运动学与结构上产生的瞬时力(1998年—2000年)。
- “Hydlines”,极大水深内底部—表面的连接水动力(1998年—2001年)。
- 谐振中横摇预报的改进与采油驳船的锚泊力(1999年—2001年)。

最后,下列人员对这本著作的编写成功作出了巨大的贡献,我想致以特别的谢意:卢瓦克·布代、陈晓波、雷蒙·宽特、斯特凡娜·艾蒂安、皮埃尔·费朗、埃马纽埃尔·方丹、奥利维耶·基蒙、西姆·马莱尼卡、西尔维·马兰、德尼·马蒂尼、让皮埃尔·莫雷尔、法班·雷米、伊夫·马里·斯科朗、伊夫·斯塔桑。

# 目 录

符号表 .....	1
第 1 章 引论 .....	3
1.1 前言 .....	3
1.2 海洋工程结构物的分类 .....	3
1.2.1 大型物体和小型物体 .....	8
1.2.2 响应和激励的分类 .....	11
1.2.3 水动力特性的计算方法 .....	17
1.3 参考文献 .....	18
第 2 章 环境 .....	19
2.1 波浪 .....	19
2.1.1 海况的概念 .....	19
2.1.2 逐波分析 .....	19
2.1.3 谱分析 .....	20
2.1.4 短期统计 .....	22
2.1.5 几个常用的谱 .....	36
2.1.6 长期统计 .....	40
2.2 风 .....	43
2.2.1 风速随高度的变化 .....	43
2.2.2 风速随参考时间的变化 .....	44
2.2.3 速度频率谱 .....	44
2.2.4 设计值的定义 .....	46
2.3 流 .....	47
2.4 内波 .....	47
2.5 平均水位的变化 .....	48
2.6 设计值的组合 .....	49

2.7	参考文献	49
<b>第3章</b>	<b>波浪模拟</b>	<b>51</b>
3.1	一般方程	53
3.2	一阶近似	54
3.2.1	规则波(艾里波)	54
3.2.2	不规则波(多色波)	63
3.2.3	一阶近似的有效性	64
3.2.4	拉伸模型	65
3.3	二阶近似	69
3.3.1	规则波(二阶斯托克斯波)	70
3.3.2	双色波	71
3.3.3	不规则波	73
3.4	三阶近似	76
3.4.1	规则波(三阶斯托克斯波)	76
3.4.2	多色波	78
3.5	$N$ 阶规则波	79
3.5.1	流函数(或傅里叶)方法	79
3.5.2	五阶斯托克斯波	81
3.5.3	极限波陡的规则波	84
3.6	波浪的非线性演化	86
3.6.1	规则波的稳定性	87
3.6.2	异常波的模拟	92
3.7	参考文献	93
<b>第4章</b>	<b>小型物体</b>	<b>96</b>
4.1	势论	96
4.1.1	水流中的固定圆柱体	96
4.1.2	静止流体中的运动圆柱体	97
4.1.3	一般情形	98
4.2	海流中的圆柱体	99
4.2.1	倾斜效应	102
4.2.2	粗糙圆柱体	102

4.2.3	非圆剖面柱体	103
4.2.4	三维效应	105
4.2.5	升力	105
4.2.6	邻近效应	107
4.2.7	海流中靠近海底的圆柱体	109
4.3	振荡流中的圆柱体	109
4.3.1	低 $K_C$ 数时的阻力系数	113
4.3.2	非圆剖面柱体	114
4.3.3	振荡流中靠近海底的圆柱体	115
4.3.4	轨道流中的圆柱体	116
4.4	正弦流与海流中的圆柱体	116
4.4.1	同向的情况	116
4.4.2	管路的稳定性与尾流模型	119
4.4.3	垂直情况	121
4.5	流诱导的振动	124
4.5.1	漩涡分离诱导的振动	124
4.5.2	诱导振动的抑制	131
4.5.3	振荡流中的诱导振动	133
4.5.4	顺流向的不稳定性	137
4.5.5	驰振	137
4.6	广义莫里森公式	139
4.7	纳维—斯托克斯方程的数值解	142
4.8	参考文献	144
<b>第5章</b>	<b>大型物体——线性理论</b>	<b>147</b>
5.1	引言	147
5.2	规则波中的线性响应	151
5.2.1	固有周期	152
5.2.2	绕射和辐射的数值求解问题	153
5.3	求解方法	154
5.3.1	(拟)解析方法	154
5.3.2	数值方法	167
5.3.3	近似方法	168

5.4	多个物体的情况 .....	172
5.5	自由液面和液舱内的晃动 .....	172
5.6	不规则波中的响应 .....	175
5.7	运动方程的时域解 .....	176
5.8	线性理论的有效性与局限性 .....	177
5.8.1	固定结构上的力 .....	177
5.8.2	浮式结构的波浪响应 .....	178
5.9	驳船和 FPSO 的横摇 .....	182
5.9.1	二次公式的依据 .....	183
5.9.2	系数 $B_Q$ 的确定 .....	183
5.9.3	对运动方程中粘性阻尼的考虑 .....	184
5.9.4	横摇最大值的统计分布 .....	188
5.10	参考文献 .....	189
<b>第 6 章</b>	<b>大型物体——二阶效应 .....</b>	<b>191</b>
6.1	引言 .....	191
6.2	规则波中的漂移力 .....	192
6.2.1	堤上的平均力 .....	192
6.2.2	垂直圆柱体上的漂移力 .....	193
6.2.3	浮式结构上的漂移力 .....	195
6.2.4	与试验结果的比较 .....	197
6.2.5	粘性效应 .....	199
6.2.6	海流的效应 .....	200
6.3	规则波中的倍频力 .....	205
6.4	双色波中的二阶力 .....	210
6.4.1	和频二阶力 .....	211
6.4.2	差频二阶力 .....	211
6.4.3	雷尼方程 .....	212
6.5	不规则波中的二阶力 .....	217
6.6	锚泊性能 .....	218
6.6.1	锚泊系统计算的传统方法 .....	219
6.6.2	慢漂运动的考虑 .....	221
6.7	慢漂运动的阻尼 .....	222

6.7.1	漂移阻尼	225
6.7.2	锚泊线产生的阻尼	227
6.7.3	船体上的粘性阻尼	230
6.7.4	各种贡献的相对重要性	237
6.8	慢漂运动的时域模拟	239
6.9	升沉、横摇和纵摇中的低频振荡	244
6.10	高频谐振(弹振)	245
6.11	参考文献	247
<b>第7章</b>	<b>大型物体——其他非线性效应</b>	<b>250</b>
7.1	高阶绕射力	250
7.1.1	三阶绕射力	253
7.1.2	数值波浪水池	254
7.1.3	非线性作用力的简化公式	256
7.2	水动力冲击	258
7.2.1	一般公式	259
7.2.2	局部压力	262
7.3	参数不稳定性	265
7.4	穿孔结构	269
7.4.1	穿孔壁的边界条件	269
7.4.2	一个一般性情况——多孔圆柱体	271
7.4.3	其他结构形式	273
7.5	参考文献	275
<b>第8章</b>	<b>水池试验</b>	<b>277</b>
8.1	引言	277
8.2	模拟原理与尺度效应	278
8.2.1	一般原理	278
8.2.2	尺度效应	279
8.2.3	模型比尺的选择	280
8.3	试验水池的描述	281
8.3.1	水池的类型	281
8.3.2	造波与消波	284

8.4	有关波浪的寄生现象 .....	291
8.4.1	造波机的近场 .....	291
8.4.2	横向与纵向的固有模式 .....	291
8.4.3	波浪生成时波幅的调制 .....	292
8.4.4	回流的出现 .....	292
8.4.5	纵向固有模式的激励 .....	292
8.4.6	本杰明—费尔失稳 .....	294
8.4.7	由造波机产生的自由谐波 .....	294
8.4.8	反射与边界效应 .....	295
8.5	波浪的类型与造波技术 .....	297
8.5.1	规则波 .....	297
8.5.2	不规则波 .....	298
8.5.3	瞬态波或波群 .....	299
8.6	流的生成 .....	299
8.7	风的表示 .....	301
8.8	测量传感器 .....	301
8.8.1	波面位移 .....	301
8.8.2	模型的运动 .....	302
8.8.3	其他测量 .....	303
8.8.4	测量精度 .....	303
8.9	测量结果的分析 .....	303
8.9.1	规则波中的试验 .....	304
8.9.2	不规则波中的试验 .....	305
8.10	水池试验的定义与利用 .....	308
8.10.1	波浪的校准试验 .....	308
8.10.2	衰减试验 .....	308
8.10.3	规则波中的试验 .....	308
8.10.4	不规则波中的试验 .....	309
8.10.5	其他试验 .....	310
8.11	参考文献 .....	311
附录 A	流体静力学 .....	313
A.1	浸没物体 .....	313

A. 1.1	流体静恢复力表达式 .....	313
A. 1.2	稳性 .....	314
A. 2	穿过自由面的物体 .....	315
A. 2.1	稳性曲线 .....	316
A. 2.2	线性流体静恢复力 .....	317
A. 2.3	流体静恢复力的二阶近似 .....	323
<b>附录 B</b>	<b>质量弹簧阻尼系统 .....</b>	<b>326</b>
B. 1	无激励的情况 .....	326
B. 2	谐波激励下的响应 .....	327
B. 2.1	$\omega \ll \omega_0$ (刚性系统) .....	327
B. 2.2	$\omega \gg \omega_0$ (惯性响应) .....	328
B. 2.3	$\omega \approx \omega_0$ (共振) .....	328
B. 3	对一个随机激励的响应 .....	328
<b>索引</b>	.....	<b>329</b>



# 符 号 表

$A$	幅值	$F$	作用力
$A$	角运动	$F_d$	漂移力
$b$	宽度	$F_n$	弗劳德数
$B$	阻尼、浮心、宽度	$g$	重力
$b_d$	归一化的漂移阻尼	$G$	重心
$B_d$	漂移阻尼	$h$	水深
$b_n$	中心力矩	$H$	波峰至波谷的高度、科钦函数
$c$	浸湿宽度	$H_m$	汉克尔函数
$C$	力矩	$H_s$	有义波高
$C_a$	阻尼系数	$i$	虚数( $i^2 = -1$ )
$C_D$	阻力系数	$I$	惯量
$C_f$	摩擦系数	$\Im$	……的虚部
$C_G$	波群速度	$J_m$	第一类贝塞尔函数
$C_m$	附加质量系数	$k$	波数
$C_M$	惯性系数: $C_M = 1 + C_m$	$K$	刚度
$C_p$	相速	$K_m$	修正的贝塞尔函数
$d$	距离、吃水	$K_S$	稳性参数
$D$	直径	$l, L$	长度、波长
$e$	比例	$m, M$	质量
$E$	包络线、能量	$m_a, M_a$	附加质量
$E$	期望值、平均值	$m_n$	谱矩
$f$	频率	$M_a, M_\beta$	稳心
$\bar{f}$	无因次频率	$n$	法向矢量
$f_*$	无因次频率	$p$	概率密度、压力
$f$	复合力	$P$	分布函数、船体上的动点
$f_d$	归一化的漂移力	$Q$	流量