



海上风力发电机组设计

HAISHANG FENGLI
FADIANJIZU SHEJI

吴佳梁 李成锋 编著



化学工业出版社

常州大学图书馆
藏书章

海上风力发电机组设计

HAISHANG FENGLI
FADIANJIZU SHEJI

吴佳梁 李成锋 编著



化学工业出版社

·北京·

本书介绍了海上风力发电机组设计的基本知识和技术,对比分析了开发海上风电的优劣势,重点剖析了海上风电开发的六大制约因素。在此基础上,提出了海上风力机的设计原则和系统解决方案、详细阐述了海上风力机的技术路线对比、风力机基础设计与施工、防腐与密封设计、防台风设计、可靠性设计、发电能力优化设计及可维护性设计的解决思路和设计方法。此外,简要介绍了海上风力机的相关标准和认证,最后对未来海上风电开发与风力机设计技术的发展趋势加以展望。

本书适合从事海上风电领域,尤其是海上风力机设计与开发的工程师和技术人员阅读参考,也适合作为高等学校相关专业通用教材,对想要了解海上风力发电的读者也是一本很好的科普读物。

图书在版编目(CIP)数据

海上风力发电机组设计/吴佳梁,李成锋编著. —北京:
化学工业出版社, 2011.9
ISBN 978-7-122-11950-6

I. 海… II. ①吴…②李… III. 海上-风力发电机-
发电机组-设计 IV. TM315.02

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第147767号

责任编辑:郑宇印
责任校对:徐贞珍

装帧设计:周遥

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街13号 邮政编码100011)

印装:化学工业出版社印刷厂

710mm×1000mm 1/16 印张19¼ 字数292千字 2012年1月北京第1版第1次印刷

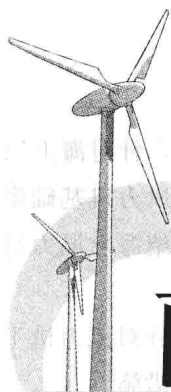
购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价: 68.00 元

版权所有 违者必究



前言

Foreword

随着 2010 年东海大桥海上风电场的并网发电及国家发改委江苏海上风电特许权开发项目开标，中国拉开了海上风电开发的序幕。我国海洋面积辽阔，海上风能资源丰富，加之我国政府相继出台了大量优惠政策和举措支持海上风电发展，各大电力公司和地方政府纷纷规划建设大型海上风电场，风电机组供应商积极研发大功率风力机来推动海上风电事业的发展。

然而，海上风力机并非简单地将陆上风力机“移植”到海上，海洋环境复杂，高盐雾浓度、台风、海浪等恶劣自然条件均对海上风力机的设计技术提出了严峻的挑战，我国在海上风力机设计开发领域仍旧比较薄弱，更缺少介绍海上风力机设计技术的图书和相关国家标准。因此，我们在研究海上风力机设计技术、总结海上风力机设计开发实践经验的基础上编著了本书，以期成为海上风力机设计的指导书，能对从事海上风力机设计研发的工程技术人员有一定的帮助。

本书是在大幅补充和修订作者前期出版的《海上风力发电技术》的基础上编著而成。本书共 10 章，全面介绍了海上风力发电机组的设计原理和设计方法。

第 1 章主要分析海上风能的特点、国内外海上风电开发的发展现状。通过分析和总结欧洲海上风电开发的历史和经验，剖析我国海上风电的现状，对我国的海上风电开发提出了新的对策。

第 2 章主要介绍海上风电开发的优势和面临的制约因素。重点分析开发海上风电需要解决的重大课题，介绍盐雾腐蚀、台风、海浪、撞击对海上风

力机的影响，突出海上风电场建设、运行和维护的艰巨性。

第3章在对比分析海上风电开发的六大制约因素的基础上，针对海上风力机设计区别于陆上的特殊性，从海上风力机技术路线选择、风力机基础多样化设计、风力机防腐蚀密封设计、基础防撞击设计四方面介绍海上风力机的特殊性设计。

第4章详细介绍海上风力机防腐蚀设计的系统解决方案，针对风力机不同部件的材质和所处环境盐雾腐蚀的差异性，提出具体的应对措施。

第5章主要分析台风的破坏机理及相应的海上风力机抗台风设计策略与手段，七大策略将对未来我国东南沿海的海上风力机设计产生重要影响。

第6章主要介绍海上风力机发电能力优化设计的方法和设计流程。

第7章主要介绍海上风力机的可靠性设计，从机械部件裕度设计、紧固连接件防松防锈、电气系统冗余设计、降额设计、电控柜设计、发电机和变频器可靠性增强设计等方面进行了详细阐述。

第8章主要讲述海上风力机的运行维护方法和可维护性设计思想，提出可维护性风力机结构设计方法、专用维护工装设计及大部件维修工艺流程。

第9章主要分析海上风力机设计标准和相关认证知识。对于风力机设计标准，横向比较了风力机设计的各类标准，分析海上与陆上风力机设计标准的差异性。关于认证详细介绍了型式认证和项目认证的相关内容。

第10章对未来海上风电开发与风力机设计制造技术发展趋势进行了展望。

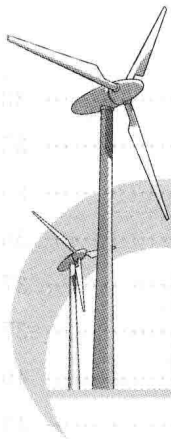
在本书的编著过程中，得到了三一电气公司胡杰、王广良、顾珊等领导的大力支持，并提出了宝贵的修改意见和建议，在此表示衷心感谢；整体研究院广大同事参与了本书的数次评审，在此一并致谢。张建海、叶凡、王兴、叶坚强、刘万辉、赵德钊等同事参与了部分编著工作。

本书的编著参阅了大量参考文献，在此对其作者一并表示感谢！

限于作者编著水平，书中不妥之处诚请广大读者批评指正。

编著者

2011年8月



目 录

Contents

第1章 海上风能与海上风力发电发展现状

1.1 海上风能与风电开发	2
1.1.1 海上风能的特点	2
1.1.2 海上风力发电机组的发展现状	6
1.1.3 海上风力发电机组应具备的特点	9
1.2 欧洲海上风力发电发展现状	10
1.2.1 欧洲海上风电技术的发展回顾	10
1.2.2 欧洲目前和近期开发的海上项目	11
1.2.3 欧洲开发海上风电的潜力	13
1.2.4 欧洲发展海上风电的经验	15
1.3 中国海上风力发电发展现状	19
1.3.1 中国发展海上风电的自然环境	19
1.3.2 中国风电场的发展现状	20
1.3.3 中国海上风电发展面临的问题	22
1.3.4 中国发展海上风电的对策	24

第2章 海上风电开发的优劣势分析

2.1 海上风电场建设	31
2.1.1 海上风电场选址原则	31
2.1.2 海上风电场的配置	32

2.1.3	海上风电场的成本	33
2.2	海上风电开发的优势	35
2.2.1	高质量的海上风资源	35
2.2.2	更多可以借鉴的经验	36
2.3	海上风电开发面临的制约因素	37
2.3.1	盐雾腐蚀对风力机的影响	37
2.3.2	台风的影响	40
2.3.3	海浪的载荷	43
2.3.4	撞击的风险	49
2.3.5	海上风电场建设的困难	51
2.3.6	运行与维护	63

第3章 海上风力机区别于陆上风力机的特殊性

3.1	海上风力机技术路线选择	68
3.1.1	风力机故障分析	68
3.1.2	主要的技术路线	73
3.2	风力机基础多样化设计	76
3.2.1	基础设计条件要求	76
3.2.2	常见的基础形式	77
3.2.3	几种基础方案比较	86
3.2.4	基础设计流程	88
3.3	基础的施工	91
3.3.1	重力式基础施工	91
3.3.2	单桩式基础施工	91
3.3.3	三角架式基础施工	94
3.3.4	导管架式基础施工	96
3.3.5	群桩基础施工	97
3.4	风力机防腐密封设计	102
3.4.1	主要的防腐蚀措施	102
3.4.2	海上风力机防腐措施	104

3.4.3	海上风力机密封措施	106
3.4.4	密封圈性能比较	108
3.5	风力机基础防撞击设计	108

第4章 海上风力机防腐蚀系统设计

4.1	防腐涂装	111
4.1.1	铸造件	112
4.1.2	锻造件	113
4.1.3	焊接件	116
4.1.4	高强螺栓联结件	120
4.1.5	风力机基础	121
4.2	加强密封	122
4.2.1	机舱罩和导流罩	123
4.2.2	齿轮箱	123
4.2.3	主轴承和回转支承	124
4.2.4	发电机	125
4.3	耐腐蚀材料应用	125
4.3.1	增速箱辅配件	125
4.3.2	发电机辅配件	126
4.3.3	液压站	126
4.3.4	集中润滑系统	127
4.3.5	非高强螺栓联结件	127
4.4	电气柜系统防腐	127
4.4.1	变桨柜	128
4.4.2	主控柜	129
4.4.3	变流器	130
4.5	防腐防锈工艺	132
4.5.1	涂料防腐工艺	132
4.5.2	防锈油防锈工艺	144
4.5.3	润滑脂防锈工艺	152

4.5.4	达克罗涂层及镀锌层修补工艺	153
4.5.5	工艺螺纹孔防护	155

第5章 防台风加强设计与应对策略

5.1	台风破坏的分析	158
5.1.1	台风的形成	158
5.1.2	台风的分布规律	159
5.1.3	台风浪的形成和传播	160
5.1.4	台风的主要特点及其对海上风力机的影响	161
5.1.5	台风破坏的原因分析	162
5.1.6	台风影响等级划分三维坐标体系	165
5.1.7	抗台风加强设计总体思路	166
5.2	传动链增强设计	167
5.3	机舱罩的加强设计	170
5.3.1	加强机舱罩连接部位	170
5.3.2	舱内设置钢板加强筋	171
5.4	风速风向仪选取	172
5.4.1	灾难性气候对风电机组的破坏	172
5.4.2	测风仪的分类及特点	173
5.4.3	风力机风向仪的故障原因及设计原则	173
5.5	测风仪应急预案	176
5.6	台风期间控制策略	176
5.7	质量阻尼器减振设计	177
5.7.1	阻尼器的分类	177
5.7.2	结构上使用阻尼器的特点	179
5.7.3	阻尼器的安置形式	180
5.7.4	海上风力机使用阻尼器的作用	183
5.8	海上风力机抗台风控制策略	185

第6章 海上风力机发电能力优化设计

6.1 风力机转速的优化	187
6.1.1 控制过程概述	187
6.1.2 控制目标	188
6.1.3 控制策略分析	188
6.2 优化模型因数分析	192
6.3 优化设计流程	193

第7章 海上风力机可靠性设计

7.1 机械部件裕度设计	196
7.2 紧固连接件防松防锈	197
7.2.1 紧固连接件总体设计原则	197
7.2.2 紧固连接件松动的原因	197
7.2.3 防松设计基本原则	198
7.2.4 防松措施	199
7.2.5 防锈	201
7.3 电气系统冗余设计	201
7.4 电气元件降额设计	202
7.5 电控柜体设计	202
7.5.1 变桨系统运行环境及影响	202
7.5.2 变桨柜设计原则及措施	203
7.5.3 海上环境对控制系统的影响	204
7.5.4 主控柜设计原则及措施	205
7.6 发电机冷却方式	206
7.6.1 冷却系统的结构和组成	206
7.6.2 冷却系统的防护	209
7.6.3 两种方式维护及运行对比	212
7.7 变流器可靠性增强设计	212
7.7.1 环境要求	212
7.7.2 可靠性影响因素	214

7.7.3	可靠度分配	218
7.7.4	可靠性增强措施	218

第8章 海上风力机的维护与可维护性设计

8.1	海上风力机的维护	221
8.1.1	安全	221
8.1.2	叶片的维修保养	222
8.1.3	轮毂的维修保养	223
8.1.4	变桨轴承的维修保养	224
8.1.5	变桨电机的维修保养	224
8.1.6	变桨减速机与变桨小齿轮的维修保养	225
8.1.7	变桨控制柜的维修保养	226
8.1.8	主轴及主轴承的维修保养	226
8.1.9	增速箱的维修保养	227
8.1.10	高速轴刹车的维修保养	229
8.1.11	高速轴联轴器的维修保养	233
8.1.12	发电机的维修保养	234
8.1.13	机舱底架的维修保养	235
8.1.14	偏航系统的维修保养	236
8.1.15	塔筒的维修保养	237
8.1.16	机舱罩与导流罩的维修保养	238
8.1.17	机组的非正常状态处理及复位方法	238
8.1.18	废品处理	239
8.2	可维护的风力机结构设计	240
8.2.1	拆卸中存在的主要问题	240
8.2.2	可维护性结构设计准则	240
8.2.3	可维护性结构设计流程	241
8.2.4	结构设计	241
8.3	大部件维护专用吊装设备	243
8.4	大部件维修工艺流程	245

第9章 海上风力机标准及认证

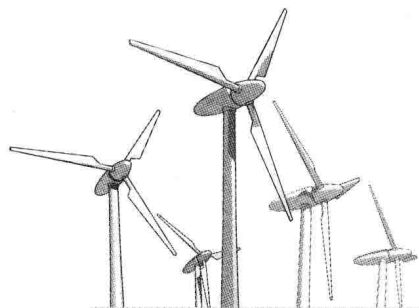
9.1 海上风力机各种标准的对比	252
9.1.1 IEC 61400-3	253
9.1.2 GL 海上风电指南	253
9.1.3 丹麦建议书	254
9.1.4 DNV-OS-J101	254
9.1.5 IEC WT01	254
9.1.6 GL 指南和 IEC 标准对风力机载荷的对比	255
9.2 海上风力机标准与陆上风力机标准的比较	257
9.2.1 陆上风力机标准	257
9.2.2 海上风力机标准	259
9.3 海上风力机认证	262
9.3.1 型式认证	262
9.3.2 项目认证	264

第10章 海上风电开发与风力机制造技术发展趋势

10.1 海上风电场建设与风电开发利用的发展趋势	270
10.2 海上风力机制造技术展望	273
10.2.1 机组功率趋向大型化	274
10.2.2 碳纤维叶片	274
10.2.3 高翼尖速度	277
10.2.4 高压直流 (HVDC) 技术和机组无功功率输出可控技术	277
10.2.5 单位扫掠面积的成本曲线降低	278
10.2.6 智能电网	278

附录 风电专业术语汉英对照

参考文献



第1章

海上风能与海上风力发电 发展现状

风能是可再生能源的重要组成部分，积极地开发风能对于改善能源系统结构、缓解能源危机、保护生态环境具有深远意义。早期的风电能源开发主要集中在陆上，陆上的风资源开发已经比较成熟。海上风电场具有高风速、低风切变、低湍流、高产出等显著优点，加之对人类的影响较小，且可充分借鉴陆上的风电技术经验，海上风电在未来的风电产业中将占越来越重要的地位，它将为风力发电在未来的能源结构中扮演重要角色做出积极的贡献。

海上风资源的丰富程度直接决定了各国海上风电的发展态势，资源丰富的地区和国家如欧洲和中国高度重视海上风电的发展，不仅在政策上积极扶持，而且开辟海上风电试验场，为海上风电产业的发展提供技术支持和项目经验，吸引各大风电投资商纷纷转向海上风电行业，推动了海上风电的快速发展。

本章主要分析海上风能、欧洲海上风力发电发展现状以及中国海上风力发电发展现状。

1.1 海上风能与风电开发

1.1.1 海上风能的特点

海上年平均风速明显大于陆地，研究表明，由于海面的粗糙度较陆地小，离岸 10km 的海上风速比岸上高 25% 以上。

1.1.1.1 风随高度的变化特性

海面的粗糙度要比陆地小得多，通常在安装风力机所关注的高度上，风速变化梯度已经很小了，因此通过增加塔高的方法增加风能的捕获在某种程度上不如陆地有效。海上风边界层低，在某种程度上海面上塔高可以降低。陆地与海上风速剖面比较如图 1-1 所示。

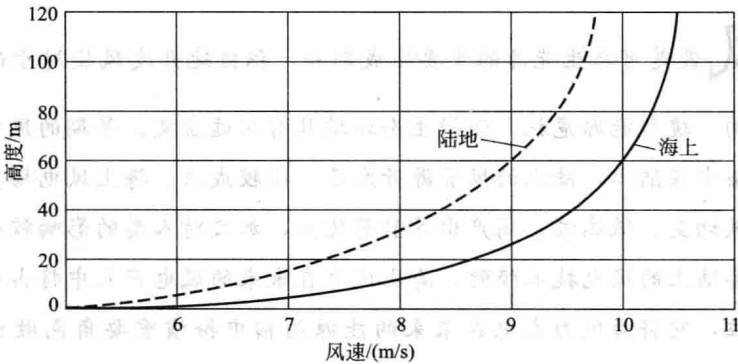


图 1-1 陆地与海上风速剖面图比较

从空气运动的角度，通常将不同高度的大气层分为三个区域（图 1-2）。离地面 2m 以内的区域称为底层；2~100m 的区域称为下部摩擦层，二者总称为地面境界层；100~1000m 的区段称为上部摩擦层，以上三区域总称为摩擦层。摩擦层之上是自由大气层。

地面境界层内空气流动受涡流、黏性和地面植物及建筑物等的影响，风向基本不变，但越往高处风速越大。各种不同地面情况下，如城市、乡村和海边平地，其风速随高度变化如图 1-3 所示。

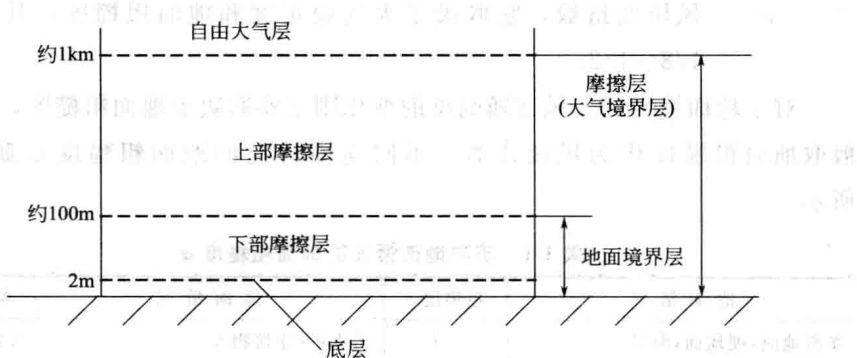


图 1-2 大气层的构成

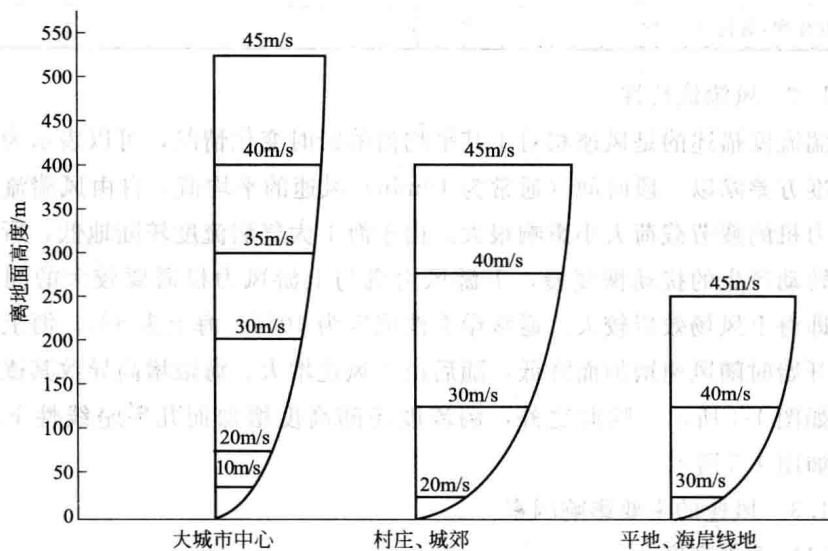


图 1-3 不同地面风速随高度的变化

风速随高度的变化情况及其大小因地面的平坦度、地表粗糙度以及风通道上的气温变化情况的不同而有所差异。

风速随高度而变化的经验公式很多，通常采用指数公式，即

$$v = v_i \left(\frac{h}{h_i} \right)^a$$

式中 v ——距地面高度 h 处的风速，m/s；

v_i ——高度为 h_i 处的风速，m/s；

α ——风切变指数，它取决于大气稳定性和地面粗糙度，其值约为 $1/8 \sim 1/2$ 。

对于地面境界层，风速随高度的变化则主要取决于地面粗糙度，这时一般取地面粗糙度作为风速指数。不同地面情况的地面粗糙度 α 如表 1-1 所示。

表 1-1 不同地面情况的地面粗糙度 α

地面情况	粗糙度 α	地面情况	粗糙度 α
光滑地面,硬地面,海洋	0.1	树木多,建筑物少	0.22~0.24
草地	0.14	森林,村庄	0.28~0.30
城市平地,有较高草地,树木极少	0.16	城市有高层建筑	0.4
高的农作物,篱笆,树木少	0.2		

1.1.1.2 风湍流特性

湍流度描述的是风速相对于其平均值的瞬时变化情况，可以表示为风速的标准方差除以一段时间（通常为 10min）风速的平均值。自由风湍流特性对风力机的疲劳载荷大小影响很大。由于海上大气湍流度较陆地低，所以风力机转动产生的扰动恢复慢，下游风力机与上游风力机需要较大的间隔距离，即海上风场效应较大。通常岸上湍流度为 10%，海上为 8%。海上风湍流度开始时随风速增加而降低，随后由于风速增大、海浪增高导致其逐步增加，如图 1-4 所示。除此之外，湍流度还随高度增加而几乎呈线性下降趋势，如图 1-5 所示。

1.1.1.3 风速的主要影响因素

(1) 垂直高度

由于风与地表面摩擦的结果，风速是随着垂直高度的增加而增强，只有离地面 300m 以上的高空才不受其影响。

(2) 地形地貌

比如，山口风速比平地大多少，则要视风向与谷口轴线的夹角以及谷口前的阻挡而定；河谷风速的大小又与谷底的闭塞程度有关。又如，在同一山谷或盆地中，不同位置的风速也不尽相同，此时往往是地形与高度较多地影响着风速，有时以前者为主，有时又以后者为主，要视具体地形而定。

(3) 地理位置

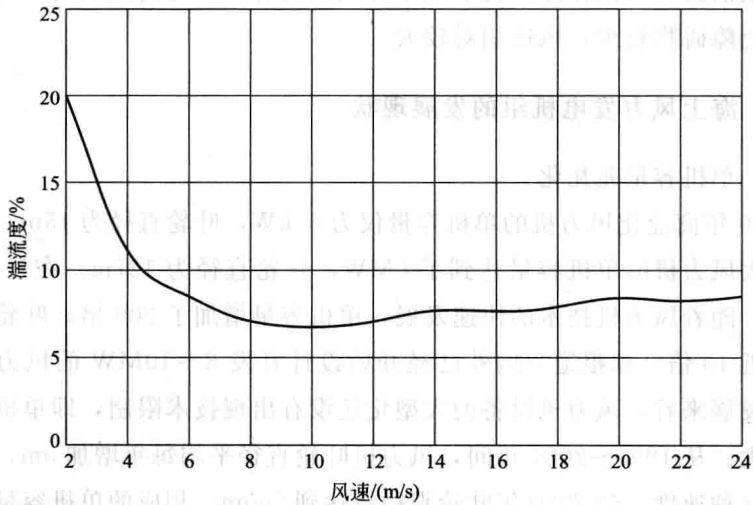


图 1-4 海上风速与湍流度的关系

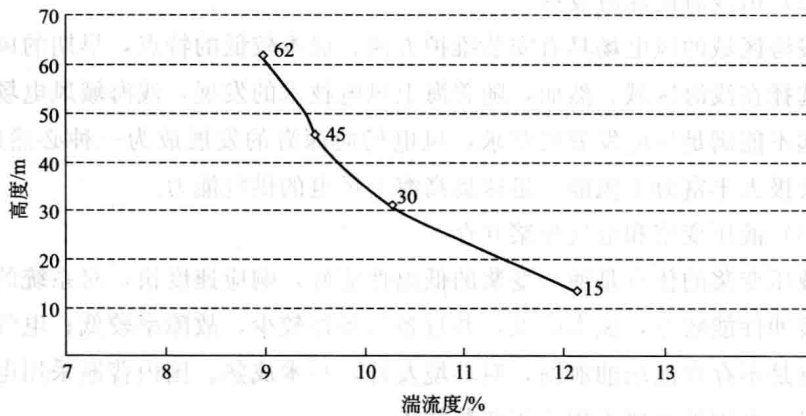


图 1-5 海面上高度与湍流度的关系

由于地表摩擦阻力的作用，海面上的风比海岸大，而沿海的风要比内陆大得多。比如，台风登陆后 100km，其风速几乎衰减了一半，又如，在平均风速为 4~6m/s 时，海岸线外 70km 处的风速要比海岸大 60%~70%。

(4) 障碍物

风流经障碍物时，会在其后面产生不规则的涡流，致使流速降低，这种涡流随着远离障碍物而逐渐消失。当距离大于障碍物高度 10 倍以上时，涡