



“十三五”普通高等教育规划教材

Economy and Risk Assessment of  
Offshore Wind Farm

# 海上风电场 经济性与风险评估

金风科技海上风电技术研究院 组 编

冯延晖 陈小海 主 编

邱颖宁 张新刚 副主编

中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



“十三五”普通高等教育规划教材

Economy and Risk Assessment of  
Offshore Wind Farm

# 海上风电场 经济性与风险评估

金风科技海上风电技术研究院 组编

主 编 冯延晖 陈小海

副主编 邱颖宁 张新刚

编 写 (以姓氏拼音为序)

冯锦章 王 菲 严辉煌

叶佳强 张 尉 周 权



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书主要介绍海上风电场的经济性和风险评估分析方法。经济性分析包括投资与成本费用分析、经济效果评价和分析的方法,风险评估分析则详细介绍了海上风电场在规划设计期、建设期及运营期的各类风险,并总结了风险防范方法和措施。本书旨在帮助读者较快地理解和掌握海上风电项目的财务评价和经济性分析方法,以及理解海上风电项目的各类风险因素。

本书可供海上风电相关的政策制定者、产业投资者、财务管理人员、风险管理人员、工程管理人员、项目管理人员参考使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

海上风电场经济性与风险评估/冯延晖,陈小海主编;金风科技海上风电技术研究院组编. —北京:中国电力出版社,2018.12

“十三五”普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-5198-2566-9

I. ①海… II. ①冯… ②陈… ③金… III. ①海上—风力发电—发电厂—经济分析—高等学校—教材②海上—风力发电—发电厂—风险评价—高等学校—教材 IV. ①TM62

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第243368号

---

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街19号(邮政编码100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:罗晓莉(010-63412547) 关 童

责任校对:黄 蓓 常燕昆

装帧设计:王英磊 郝晓燕

责任印制:钱兴根

---

印 刷:三河市万龙印装有限公司

版 次:2018年12月第一版

印 次:2018年12月北京第一次印刷

开 本:710毫米×1000毫米 16开本

印 张:12.25

字 数:196千字

定 价:48.00元

---

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换



我国拥有漫长的海岸线，海上风能资源丰富，根据国家海洋局的评估结果，我国近海 10m 高度风能储量为 9.4 亿 kW（未统计台湾省）。海上风电项目通常毗邻电力负荷中心和经济发达地区，较易实现发电并网，避免长距离的专用配套输变电设施的投资，线路建设成本和线损相对低，在经济性合理的前提下可以成为解决当地用电缺口支撑经济发展的一种有效途径。

海上风电项目属于新型的海上基础设施建设项目。鉴于海上作业条件及设备设施运行环境的特殊性，海上风电项目的经济性和风险一直是能源产业界关注的热点，并且常常以此作为重要的考核因素来全面地评价整体项目和具体工程技术实施的可行性，也便于在实践中通过工程技术和管理的对已辨认的风险进行控制，尽量减少损失。海上风电项目须遵循安全生产的标准和原则，应按照相关规定进行安全风险分析并建立应急预案，保障安全生产事故应急救援工作高效、有序地进行，尽量减少人员伤害和财产损失。

本书第 1 章主要介绍海上风电场的概况和目前的发展机遇，阐述经济效果评价和风险分析的重要性。第 2 章介绍投资与成本费用，包括设计概算、总投资构成、总成本费用、主要组件成本、海上作业费用、运营与维护成本。第 3 章介绍经济效果评价和分析的方法，包括财务报表编制、财务评价指标、敏感性分析、计算误差分析、节能效益和环境效益分析方法、决策结构与评价方法。第 4 章介绍海上风电项目的风险，在政策与市场、风资源评估、自然环境、安装施工、设施设备、运营与维护、靠离与通航、管理与意外风险多个类别中进行详细阐述。第 5 章总结了风险防范方法，对台风防范、运维船优选、通航安全保障、海缆防护、防雷击、防腐蚀等具有海上特性的风险控制措施和方法进行专题介绍。

本书主要提供给与海上风电相关的政策制定者、产业投资者、财务管理人员、风险管理人员、工程管理人员、项目管理人员作为参考使用，旨在帮助读者较快地理解和掌握海上风电项目的财务评价和经济性分析方法，以及

理解海上风电项目的各类风险因素。文中结合案例提供了财务表格编制和各类指标计算方法的详细说明，厘清重要概念和关键的风险因素以帮助决策者和管理者更好地理解海上风电项目的特殊性，从而做出优化的安排和决策。

全书由金风科技海上风电技术研究院组编，由冯延晖、陈小海、邱颖宁和张新刚等编写，研究生袁明友、苏建国帮助进行本书案例的财务数据表格的制作和校对，以及风险分析和附录资料的整理、归纳及核实。

本书在编写过程中得到了江苏金风科技有限公司、中国电力出版社的鼎力支持，在此表示诚挚的谢意。海上风电工程是一个新兴的产业，所面临的问题错综复杂，即便本书在编写过程中查阅和调研了大量参考文献、现实案例和国内外出版物，亦难以面面俱到。本书未能详尽之处，谨此表示歉意和敬意。

限于作者水平，书中难免存在疏漏和不足之处，恳请广大读者批评指正。作者电子邮箱 [yanhui.feng@njust.edu.cn](mailto:yanhui.feng@njust.edu.cn)。

冯延晖  
2018年7月





前言

<b>1</b>	<b>海上风电场概述</b> .....	1
1.1	海上风电场的优缺点及典型组成 .....	3
1.2	海上风电的发展机遇 .....	4
1.3	经济效果评价的重要性 .....	7
1.4	风险分析的重要性 .....	8
<b>2</b>	<b>投资与成本费用分析</b> .....	11
2.1	设计概算 .....	13
2.2	总投资构成 .....	14
2.3	总成本费用 .....	17
2.4	主要组件成本 .....	21
2.5	海上作业费用 .....	29
2.6	运营与维护成本 .....	35
<b>3</b>	<b>经济效果评价和分析</b> .....	41
3.1	财务报表编制 .....	43
3.1.1	利润和利润分配表 .....	44
3.1.2	现金流量表 .....	47
3.1.3	资产负债表 .....	49
3.2	财务评价指标 .....	50
3.2.1	盈利能力指标 .....	51
3.2.2	清偿能力指标 .....	54
3.2.3	度电成本 .....	55
3.3	敏感性分析 .....	58
3.3.1	单因素敏感性分析 .....	58
3.3.2	敏感度系数 .....	60
3.3.3	敏感因素分析和排序 .....	63

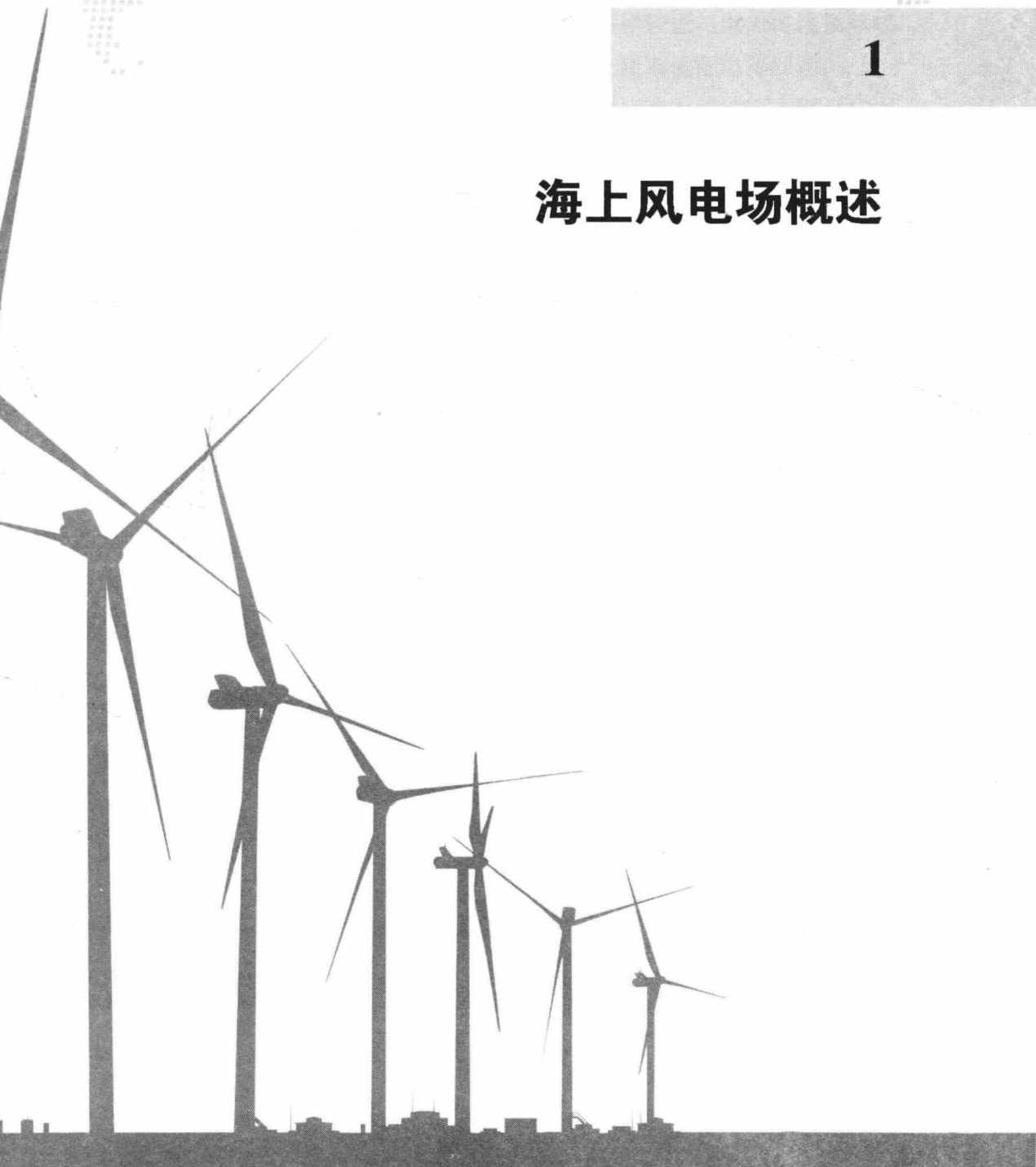
3.3.4	项目容量对收益率敏感性的影响	66
3.3.5	单位造价对发电量敏感性的影响	68
3.3.6	竞争方案优化方法	70
<b>3.4</b>	<b>计算误差分析</b>	74
3.4.1	绝对误差分析	75
3.4.2	相对误差分析	79
<b>3.5</b>	<b>节能效益和环境效益分析</b>	83
<b>3.6</b>	<b>决策结构与评价方法</b>	84
3.6.1	决策类型	84
3.6.2	增量分析法	85
<b>4</b>	<b>项目风险分析</b>	87
<b>4.1</b>	<b>政策与市场情况分析</b>	89
<b>4.2</b>	<b>风资源评估</b>	94
<b>4.3</b>	<b>自然环境风险</b>	96
4.3.1	台风威胁	96
4.3.2	海洋威胁	101
<b>4.4</b>	<b>安装施工风险</b>	105
4.4.1	安装过程风险	106
4.4.2	安装施工管理	108
<b>4.5</b>	<b>设备设施风险</b>	108
4.5.1	海上风电机组	109
4.5.2	海上升压站	114
4.5.3	海底电缆	116
<b>4.6</b>	<b>维护风险</b>	117
4.6.1	大部件维修更换	118
4.6.2	定期维护	119
4.6.3	人员作息	119
4.6.4	交通工具	119
<b>4.7</b>	<b>运维船风险</b>	121
4.7.1	运维船性能	121
4.7.2	运维船靠离	123
4.7.3	通航安全	124
4.7.4	应急救援	125
<b>4.8</b>	<b>管理与外力风险</b>	125
4.8.1	管理风险	125
4.8.2	外力破坏	126
<b>4.9</b>	<b>风险评价流程</b>	126

<b>5</b>	<b>项目风险防范</b> .....	129
5.1	台风灾害防范 .....	131
5.2	通航安全保障 .....	133
5.3	叶片防护 .....	134
5.4	海上防雷击 .....	135
5.5	海上防腐蚀 .....	136
5.6	海底电缆防护 .....	137
5.7	运营维护与诊断 .....	138
5.8	安装船舶选择 .....	139
5.9	运维船优选 .....	141
5.9.1	船型选择 .....	141
5.9.2	主体材料选择 .....	141
5.9.3	主尺度和推进系统选择 .....	143
5.9.4	船舶噪声与振动 .....	143
5.9.5	船舶摇摆性 .....	144
5.9.6	船舶安全管控 .....	144
5.10	事故应急预案 .....	144
附录 A	截至 2017 年 7 月中国已建成海上及 潮间带风电项目 .....	146
附录 B	中国在建海上风电项目 .....	149
附录 C	中国待建海上风电项目 .....	152
附录 D	工程特性表 .....	153
附录 E	设计概算表 .....	156
附录 F	财务评价附表 .....	160
附录 G	风险评估附表 .....	169
附录 H	我国广东、福建、浙江三省份台风登陆 信息汇总 (1949—2016) .....	170
参考文献	.....	186



1

# 海上风电场概述





## 1.1 海上风电场的优缺点及典型组成

开发海上风电项目的主要原因有海上风速远高于陆上，风力稳定，且风力机捕获的能量与风速的三次方成正比，海上风力发电机可以捕获更多的能量。

海上风电项目的主要优点包括：负荷中心距离海岸较近，电力传输损耗较少；海上风电并网受电网侧限制较小，避免了陆上长距离输配电等问题。

相比起陆上风电场，我国海上风电场的投资较高，海上维护不方便且成本较高，海上设备和设施容易受海水、盐雾腐蚀和自然环境影响，海上工程技术复杂和特殊作业要求导致相关费用增加。

一个典型海上风电场的主要构成部分如图 1-1 所示，主要由测风塔、海上升压站、陆上变电站以及在海域内的多台风电机组组成。风力发电机的基础安装在海床上，塔架支撑着机舱和三叶片组成的风轮，机舱内部是实现机械能到电能转换的主轴、齿轮箱、发电机、变流器、变压器等部件。海上风电机组与海上升压站之间（35kV/110kV）可采用不同的拓扑形式通过海底电缆进行互联，其中主要分为链形、环形和星形三种组网形式。海上升压站将电能的电压等级提升至 110kV，通过高压海底电缆送至岸上变电站，后者将电能进一步升压后汇入主电力网。风电场集控中心一般建于陆上变电站附近，扮演着协调控制整个电站运行和维护的角色。在海上风电项目的建设安装期，各类的机组

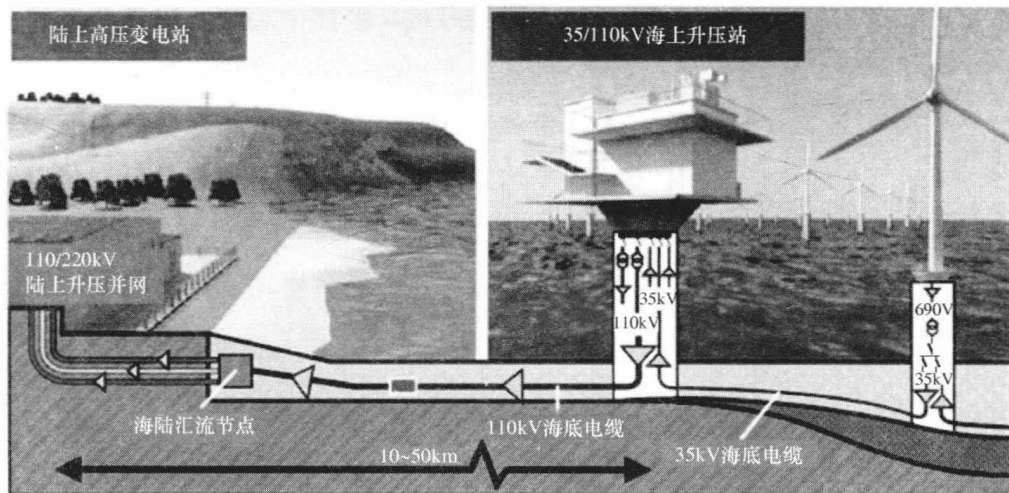


图 1-1 典型海上风电场的组成



结构和部件整齐地摆放在码头，运输驳船或安装船从码头装载上这些部件后驶往指定海域（图 1-2），由安装船或起重船在海上进行现场安装；在运营期，运维船往来于海上设施与码头之间进行人员和材料物资的运送。



图 1-2 运输驳船在码头进行机组塔架和机舱的装载

## 1.2 海上风电的发展机遇

我国的海上风电项目包括了近海（在理论最低潮位以下 5~50m 水深的海

域）和深海（大于理论最低潮位以下 50m 水深的海域）的风电项目，以及我国特有的潮间带和潮下带滩涂的风电项目。潮间带和潮下带滩涂海域专指在我国沿海多年平均大潮高潮线以下至理论最低潮位以下 5m 水深内的海域。该类海域主要分布在江苏、上海和山东沿海地区，龙源电力集团股份有限公司（以下简称龙源电力集团）自 2010 年起率先在该类海域尝试进行风资源开发利用并积累了较为丰富的工程实践经验。如图 1-3 所示为龙源电力集团在江苏省南通市如东县投产的海上示范风电场。



图 1-3 江苏省南通市如东县投产的海上示范风电场

近年来我国的企业在海上风电机组和海上升压站的安装、维护等方面作出了很多探索，其中就包括研究风电机组单桩基础的沉桩技术，如图 1-4 所示龙源电力集团在江苏省南通潮间带实施的单桩风电机组基础设计与施工。该项技术取消了传统单桩中的过渡段，通过优化顶法兰结构和研制扶正导向架，对沉桩垂直度实行监测与校正等一系列施工工艺技术，实现了在打桩过程中对单桩的有效导向和纠偏，最终垂直度误差率控制在 0.2%，同时有效地降低了施工成本和缩短了施工周期。



图 1-4 江苏省南通潮间带单桩风电机组基础设计与施工

2017 年 6 月，世界首座分体式 220kV 海上升压站在江苏大丰 20 万 kW (200MW) 海上风电项目场区吊装成功，其吊装场景如图 1-5 所示。

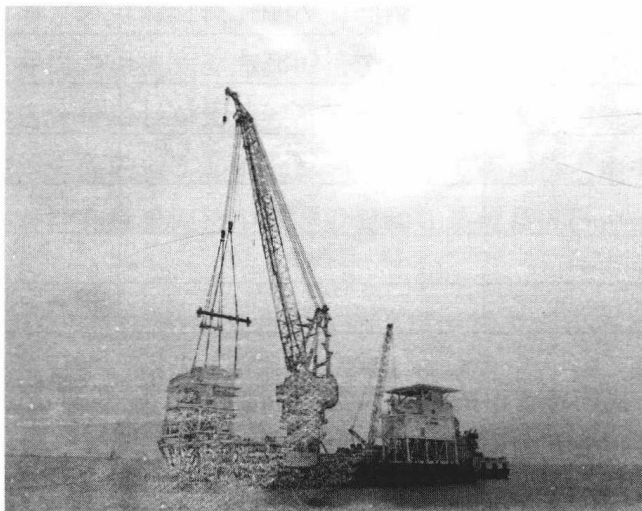


图 1-5 220kV 海上升压站在江苏大丰的吊装



经过这几年的探索，我国企业逐渐掌握了成套的海上风电场施工方法和技术，研制了配套的施工装备和施工船舶，可以多个海上施工作业面同时开工，年施工能力大大增强，施工成本压力大为缓解，这些都为后续大规模开发潮间带和近海风电项目奠定了基础。目前，前期建成投运的规模化项目主要集中在东部沿海地区，包括上海东海大桥一期 102MW 海上风电场、龙源江苏如东 32MW 潮间带试验风电场、龙源江苏如东 150MW 潮间带示范风电场、龙源江苏如东 50MW 潮间带增容项目。其中，我国第一个大型商业化的海上风电场是 2010 年建成并网发电的上海东海大桥一期项目。2017 年 2 月，我国第一批海上风电特许权项目之一的鲁能江苏东台 200MW 海上风电场成功并网发电。该风电场由 50 台 4MW 风电机组，一座 220kV 海上升压站和一座陆上集控中心组成。截至 2017 年底，我国已建成近二十个海上风电项目，大多数为试验和示范项目，在建及待建的海上风电场二十余座，具体情况请参见附录 A~附录 C。

我国拥有丰富的海上风资源，根据国家海洋局的评估结果，我国近海 50m 等深线以浅海域 10m 高度风能储量为 9.4 亿 kW（未统计台湾省）。2016 年，我国海上风电装机容量新增 592MW，截至 2016 年底累计装机达到 1627MW，跃居全球海上风电第三大国，仅次于英国和德国。表 1-1 展示了我国近年来海上风电的装机容量情况。

表 1-1 中国海上风电各年累计及新增装机容量 (2010—2016)

年份	累计 (MW)	当年新增 (MW)
2010	153	135.5
2011	262	109
2012	389	127
2013	428	39
2014	658	230
2015	1035	377
2016	1627	592

根据估计，我国各省市的近海风资源储量如图 1-6 所示。江苏省因为近海风资源丰富，较少受到台风影响，所以在我国海上风电发展初期受到了各方青睐，开发的项目在江苏沿海的南通和盐城一带海域比较集中。随着国内施工技术和国产风电机组技术的进步，近年有了新的发展趋势，海上风电开发逐渐

往长江以南的地区拓展，特别是近海风资源最为丰富的福建地区。详细情况请参考附录 B 和附录 C。国家能源局出台的《风电发展“十三五规划”》显示，我国海上风电的建设规模在 5 ~ 10 年内将会加速推进，计划海上风电到 2020 年累计并网容量达到 5000MW 以上，海上风电迎来新一轮的发展机遇。

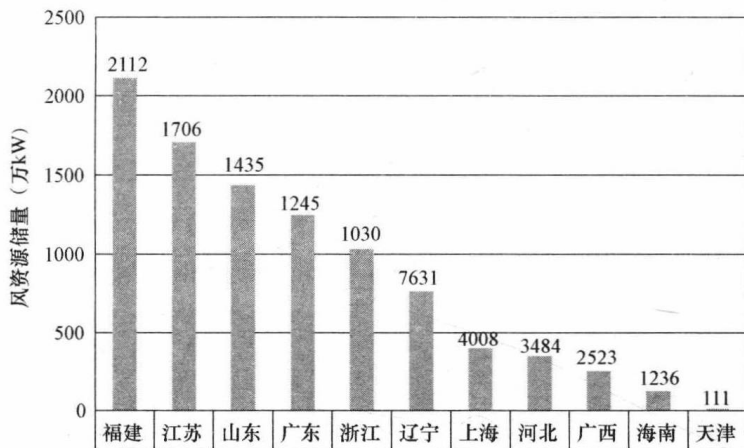


图 1-6 我国各省（市、区）近海风资源储量

### 1.3 经济效果评价的重要性

海上风电项目的经济效果评价包含财务评价和社会效果评价两个部分，前者是在现行针对海上风电的财税制度和上网定价体系之下，从项目财务角度评价项目的基本生存能力、盈利能力和可持续性，属于微观评价；后者是从项目地区整体角度分析评价项目对当地经济发展、城镇建设、劳动就业、海洋资源利用、生态环境等方面的现实和长远影响，属于宏观评价。本书将重点讨论财务评价部分，并对社会效果评价中节能效益和环境效益进行评价的方法和计算作了简单介绍。

2012 年 10 月，国家能源局发布了《海上风电场工程可行性研究报告编制规程》(NB/T 31032—2012)，该规程于 2013 年 3 月 1 日起实施，规范了海上风电项目可行性研究报告主要包括风能资源、海洋水文、工程地质、机组选型、布置及发电量估算、电气、土建工程、施工组织设计、设计概算、节能降耗、财务评价与社会效果分析等二十个部分。其中，财务评价是海上风电投资



项目评价经济效果的核心内容，是对投资项目的财务可行和经济合理性进行分析论证的重要部分。结合定量与定性分析，静态与动态分析，敏感性分析等现代分析方法，为项目投资的科学决策提供了有力的依据。

在海上风电项目设计概算过程中，需要注意到设计院、整机制造厂商和评标专家这三个计算主体对经济效果评价的侧重点不相同，考察的重点也会有所区别。财务分析和风险分析人员需正确理解各种成本费用所包含的工程技术关键，在估算过程中正确地体现那些涉海的重要影响因素。在评估过程中，应特别注意参加比选的不同备选方案须满足可比性要求，包括收益与费用的计算范围、口径和采用价格的可比性、方案风险水平的可比性，以及评价所使用假定的合理性，采用不同概算及经济评估模型时需满足可比性的效益指标。

### 1.4 风险分析的重要性

海上风电项目受到复杂海洋环境的影响，高盐雾、台风、海浪、潮汐等恶劣的自然条件均对海上风电机组及海上升压站、海底电缆等配套设施的安装、运行和维护管理提出了严峻的挑战。相比陆上项目，海上风电项目需要更高的安全性、可靠性、可达性和可维护性，对施工安装和运营维护的成本控制也提出了更高的要求。风险分析应贯穿于项目规划与设计期、建设期与运营期的全生命周期。在项目建设的决策阶段，借助风险分析的测算结果，重点分析影响项目生存的关键风险因素，判断风险的性质、类型及可能造成的影响，以及可能采取的措施。例如：在规划与设计期，项目会面临政策变化与市场价格波动等风险；在项目建设期和运营期，海上风电项目主要面临自然环境、工程技术和管理等风险。管理人员依据风险评估结果和借助风险管理方法，通过技术、工程、管理和金融等手段对风险进行规避、控制和转移。

在可行性研究的过程中，财务分析也应结合风险分析，通过仔细识别和审核报告中的资金筹措、投资建设、成本费用、利润收入等经济数据，评估成本费用是否已把可能影响项目进程的各类风险考虑在内，确认风险存在的理由是否充分，从而起到减少投资决策风险、保障投资收益的作用。如果能对项目全周期进行合理的风险识别与分析，并且提出合适的风险控制措施，那么无疑将会大大地提高海上风电项目的可行性和经济性。

在海上风电场建设施工期间进行巨大风轮的吊装是最具风险的主体工程之一，如图 1-7 所示。海上风电场在运营期间所面临的风险威胁亦不容忽视，譬如海水和盐雾会对海上机组的基础结构、塔架、叶片、机舱和电气设备等构成腐蚀，从而影响风轮气动性能，破坏机组强度，降低机组承载能力，引发电气设备早期故障损毁。我国海上机组腐蚀风险的威胁已引起风电机组厂商和开发商的广泛重视，目前已开展针对海上风电机组的防腐蚀工程，降低设备设施在运行过程中的风险，从经济性的角度这样做会相应地增加成本费用。

在项目的全生命周期内，充满了来自于自然环境、安装施工、设备设施、运营维护、运维船靠离与通航等诸多方面的风险。若要海上风电项目获得良好收益，避免发生海上安全事故，必须对这些风险有充分的认识和应对措施。



图 1-7 安装船进行风轮的吊装