



Energy and Environment Programme

“台风对中国近海风电开发影响研究

/EEP-PMU/CN/126077/RE003”

项目技术报告

2009年11月

提交日期: 2009 年 11 月 5 日

接收人: Mr. Frank Haugwitz
Energy and Environment Project Manager

呈报人: 罗勇, 国家气候中心副主任
国家气候中心(NCC)
中国气象风能太阳能评估中心 (CWERA)
北京海淀区中关村南大街 46 号, 100081
Tel : +86-10-68406488
Fax: +86-10-62176804



本报告完成人:

闫俊岳 项目负责人
张秀芝 首席专家, 第2负责人
游立军 系统开发专家
张容焱 台风专家
高建芸 风能专家
李强 初级气候学者 (1)
孙启振 初级气候学者 (2)
文明章 GIS专家
尹宜舟 项目管理员 1
Lucie Vaucel 项目管理员2
杨校生 资深风电专家
曲海滨 风电专家
邢旭焯 地区风资源专家
吴金城 地区风电专家
林秀芳 地区台风专家 (福建1)
鲍瑞娟 地区台风专家 (福建2)
陈胜军 地区台风专家
梁志强 地区风电场工程师
王欣雯 会计
吕心艳 项目秘书1
宝乐尔其木格 项目秘书2



前言和致谢

中国-欧盟能源环境项目(EEP; www.eep.org.cn)是欧盟和中国政府于 2002 年 4 月 3 日成立的融资协议中所设立的项目。此项目执行期为 6.5 年,从 2003 年 5 月开始到 2009 年 11 月。

中国-欧盟能源环境项目由中华人民共和国商务部(MOFCOM)管理,由发展和改革委员会(NDRC)、中华人民共和国科学技术部(MOST)、能源研究所(ERI)以及中国石油天然气集团公司(CNPC)联合代理执行项目。

中国-欧盟能源环境项目目标:

- 1、促进中方和欧洲行业公司在中国能源市场的合作;
- 2、巩固中欧双方能源供应担保;
- 3、与国际目标接轨(主要体现在气候变化框架),保护全球环境,确保可持续发展。

中国-欧盟能源环境项目设立目的是为了支持中欧宏观能源发展策略,在此框架下,项目主要的体现在四个方面:

- 1、能源政策发展(EPD)
- 2、能源效应(EE)
- 3、可再生能源利用(RE)
- 4、天然气利用(NG)

中国-欧盟能源环境项目对于可再生能源利用的具体目标是:

- 1、可再生能源发展政策
- 2、可再生能源产品开发标准和认证体系
- 3、可再生能源发电系统培训
- 4、开展可行性研究和示范项目,让新技术得以推广

中国-欧盟能源环境项目为了执行以上可再生能源框架内的四大目标,于 2007 年项目公开邀标:

- 1、巩固政策的发展能力
- 2、农村地区的生物能资源开发
- 3、中国海上风能开发



4、中国西部农村电力开发能力建设

其中可再生能源框架下为两个方面作出赠款项目招标：**2**、农村地区的生物能资源开发和 **3**、中国海上风能开发。

国家气候中心于 **2008 年 10 月** 签订了“中国海上风能开发”下的“台风对中国海上风电开发影响研究”项目合同，执行期为 **12 个月**，最终报告根据欧盟赠款框架下的预期结果交付。

这一项目由欧盟提供财务支持，气候中心匹配 **50%**，交付成果和内容由项目的受益方 -- 国家气候中心独立承担责任，在任何情况下都不代表欧盟立场。

特别鸣谢欧盟和中国-欧盟能源环境项目的全力支持，他们的专家团队为项目提供技术上和行政上大力协助，使本项目取得成功。



摘 要

项目背景

中国沿海是重要的经济发展区，能源短缺成为制约其发展的瓶颈。中国沿海风能资源丰富，开发沿海风能资源是缓解沿海地区电力紧张局面和温室气体减排的重要途径。

然而，中国近海是热带气旋活动频繁的地区，热带气旋引起的大风、海浪和风暴潮等恶劣天气时常使海洋和沿岸工程受损，如 2006 年 8 号台风‘桑美’在浙江苍南登陆，登陆时中心附近最大风力 68m/s（50m 高度），苍南风电场若干叶片折断，个别塔筒折断或倒塌，损失 7000 万元左右。由此可见，在热带气旋活动频繁的东南沿海，风电开发必须面对热带气旋的影响，这是中国气候与欧洲气候的最大差别。因此风机设计制造和 IEC 标准都需要适应中国的气候特点，特别是适应热带气旋影响的气候特点

研究目标

- 通过对 1961-2007 年影响中国沿岸和近海热带气旋的分析研究，获得不同风机安全等级台风风速的出现频率和 50 年一遇设计风速，以及台风影响下最大风向变化、风垂直变化；
- 利用中尺度模式、微尺度模式，进行复杂地形和平坦地形下台风风速、风向模拟试验，台风影响风电场的风场仿真方法研究，为风电场选址和风机布局以及损失评估提供科学依据；
- 编制防台风手册，指导风电场管理人员合理防御台风

预期结果

- 获得沿岸各测站和近海 50km×50km 分辨率的 WTGS 安全等级 50 年一遇设计风速，为风机设计、风电场选址和风电场抵御台风风险提供参考；
- 得到台风影响下风向变化和风垂直变化规律，为风电场选址、风电场管理人员合理防御台风提供科学依据；
- 建立影响中国近海风电场台风检索系统，用户可根据需要查询热带气旋路径沿岸各台站和近海各网格点热带气旋最大风速和 50 年一遇最大风速；
- 研究复杂地形和平坦地形下台风风速、风向和湍流特征，台风影响风电场



- 的风场仿真方法，为风电场选址和风机布局提供科学依据；
- 编制风电场防台风手册，指导风电场管理人员合理防御台风。

项目主要成果

项目按照预期目标和工作计划，开展了深入的研究工作，具体如下：

- 成果 1** 完成了 1961-2007 年影响中国近海和沿岸热带气旋的统计，分析了热带气旋的生成原地、移动路径、登陆点及风场特性；采用非对称台风风场模型计算了每个进入中国近海的热带气旋 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 网格点的风场分布，根据计算的大风序列计算了每个网格点 50 年一遇最大风速。
- 成果 2** 利用 80 多个测风塔的观测资料，研究了热带气旋影响期间地面和 50 米、70 米高度的水平风场、近地面层湍流强度和垂直风切变规律，特别分析了 3 个典型台风个例的风场、湍流强度和垂直风切变特征。
- 成果 3** 建立了影响中国近海风电开发热带气旋检索系统。
- 成果 4** 利用中尺度数值模式 WRF，通过地形敏感性试验，从理论上解释了台湾岛复杂地形和海平面平坦地形下台风强度变化机制。
- 成果 5** 编写了《台风对我国风电开发的影响与对策》一书，全书共分 6 章：

第一章 影响中国大陆沿岸和近海地区的热带气旋气候特征

第二章 热带气旋风场特性分析

第三章 热带气旋对风电开发的影响

第四章 沿海风电开发中台风应对策略

第五章 风力发电机组抗台风加强措施

第六章 风电场台风应急管理

项目研究内容超过了项目预期目标，取得了如下创新结果：

- 将登陆中国大陆的热带气旋分 8 个区域进行统计分析，发现浙江沿海、福建北部沿海区域登陆数随年代明显增加；浙江以北近海呈明显减少趋



势；闽中、闽南和珠江口以东沿海年代际变化不大；粤西和雷州半岛、海南岛区域呈减少趋势；

- 利用非对称台风风场模型计算了中国近海 50km×50km 网格点热带气旋过程最大风速序列，由此得到了近海 50 年一遇最大风速分布和不同风机运行等级风速出现频率；
- 利用 85 座测风塔资料和大量地面气象资料，分析了 19 个热带气旋影响期间的水平风场、风垂直切变、湍流强度，揭示了距热带气旋中心不同距离、不同地形、不同下垫面、不同风向情况下风垂直切变、湍流强度变化特征；
- 利用中尺度数值模式 WRF，通过地形敏感性试验发现，在无地形情况下台风运动较快，台湾地形存在使台风在登陆前 3 个小时左右就开始减弱，登陆后地形影响了台风赖以维持或发展的动力和热力来源，使台风动力和热力场结构变得非对称，并且地形越高非对称性越明显，“眼区”堵塞越快、越剧烈；“眼壁”结构也越不完整。
- 《台风对中国近海风电开发的影响与对策》以沿岸和海上风电开发之科学问题和需求，集台风专家和风电专家之经验，从影响中国大陆沿岸和近海地区的热带气旋气候特征开始，逐步深入，阐述了热带气旋风场特性分析，热带气旋对风电开发的影响、风力发电机组抗台风加强措施、沿海风电开发中台风应对策略以及风电场台风应急管理。内容新颖，结构严谨，图文并茂，具有知识性、可读性和实用性。



目 录

前言和致谢.....	III
研究目标.....	v
预期结果.....	v
1 项目基本情况	1
1.1 背景	1
1.2 研究目标和预期结果.....	2
1.2.1 研究目标.....	2
1.2.2 预期结果.....	2
2 成果 1 沿岸各测站和近海 50KM×50KM 分辨率 50 年一遇设计风速计算.....	3
2.1 影响中国近海热带气旋的基本特征	3
2.1.1 中国近海热带气旋出现频数.....	3
2.1.2 中国近海热带气旋的路径特征.....	4
2.1.3 热带气旋登陆中国大陆沿岸的特征.....	5
2.2 使用非对称台风风场模式计算进入中国近海的热带气旋水平风场	6
2.2.1 非对称台风风场模型介绍.....	7
2.2.2 计算.....	11
2.2.3 与实测风场比较.....	11
2.2.4 与气象站实测风速比较.....	12
2.3 台风影响下各网格点极端最大风速计算.....	14
2.3.1 Poisson-Gumbel 联合概率分布模型	14
2.3.2 计算结果分析.....	16
2.3.3 利用 Weibull 极值分布模型计算.....	17
2.4 沿岸各测站 50 年一遇最大风速计算.....	19
2.4.1 沿岸气象站有观测以来的最大风速分布.....	19
2.4.2 沿岸各测站 50 年一遇最大风速.....	20
2.5 小结	20
3 成果 2: 热带气旋影响下风的变化特性研究	21
3.1 测风塔数据收集处理.....	21



3.2	2009 年 8 号台风“莫拉克”	21
3.2.1	地面和 50 米高水平风场分布特征	22
3.2.2	湍流强度	27
3.2.3	风速垂直切变	30
3.3	热带气旋影响下湍流强度变化规律	33
3.4	热带气旋影响下风速垂直切变规律	36
4	成果 3: 建立影响中国近海风电开发热带气旋检索系统	40
4.1	影响中国近海风电开发热带气旋检索系统结构	40
4.2	检索系统技术要求	40
4.3	检索系统功能	40
4.3.1	数据管理模块	40
4.3.2	热带气旋路径查询模块	40
4.3.3	统计特征查询模块	41
4.3.4	极值风速模块	41
4.3.5	输出模块	41
4.3.6	帮助	41
4.4	影响中国近海风电开发热带气旋检索系统使用说明	43
4.4.1	功能及特点	43
4.4.2	系统软硬件要求	43
4.4.3	操作说明	43
5	成果 4: 研究复杂地形和平坦地形下台风强度变化特征	47
5.1	WRF 中尺度数值模式简介	48
5.2	WRF 主要模块及其功能	49
5.3	控制试验参数设置	50
5.4	模拟结果分析	51
6	成果 5: 编写《台风对我国风电开发的影响与对策》一书	56
6.1	第一章 影响中国大陆和近海地区的热带气旋气候特征	56
6.1.1	西北太平洋、中国近海热带气旋基本特征	57
6.1.2	海上多年一遇最大风速	58
6.1.3	中国大陆沿岸多年一遇最大风速	60
6.2	第二章 热带气旋风场特性分析	61
6.2.1	典型台风个例分析	61
6.2.2	典型热带气旋的湍流强度和垂直风切变	62
6.3	第三章 热带气旋对风电开发的影响	63
6.3.1	热带气旋对风电开发影响分析	63
6.3.2	台风对风电机组和其他方面的破坏	64
6.3.3	台风作用下风电机受损机理分析	70



6.4	第四章 沿海风电开发中台风应对策略	71
6.4.1	热带气旋影响地区风电机组及附属设备选型	71
6.4.2	热带气旋影响地区风电技术的改进	72
6.5	第五章 风力发电机组抗台风加强措施	73
6.5.1	部件承载能力的加强	74
6.5.2	主动保护措施	75
6.5.3	‘台风状态’模式控制程序说明	77
6.6	第六章 风电场台风应急管理	77
6.6.1	制定科学的防台预案	78
6.6.2	热带气旋到来之前的预警	78
6.6.3	热带气旋临近时应急措施	78
6.6.4	台风应急的准备工作	79
6.6.5	台风不同状态下的应急措施	80
6.6.6	台风袭击时的工作	80
6.6.7	灾后评估和恢复生产	81
7	总结	82



台风对中国近海风电开发影响研究

1 项目基本情况

1.1 背景

中国沿海是重要的经济发展区，能源短缺成为制约其发展的瓶颈。中国沿海风能资源丰富，开发沿海风能资源是缓解沿海地区电力紧张局面和温室气体减排的重要途径。

然而，中国近海是热带气旋活动频繁的地区，热带气旋引起的大风、海浪和风暴潮等恶劣天气时常使海洋和沿岸工程受损，如2003年第13号台风‘杜鹃’于8月29日生成，一路西行，强度不断加强，9月2日19时50分在红海湾西岸的惠东登陆，登陆时中心附近最大风力12级，为汕尾地区近三十年之最，使得在碣石湾西海岸刚刚建成投产的红海湾风电场25台风机中13台受到不同程度的损坏。2006年8号台风‘桑美’于8月5日在关岛东南海域生成，9日18时加强为超强台风，10日17时25分在浙江苍南县马站镇登陆，登陆时中心附近最大风力68m/s（50m高度），为建国以来登陆最强的台风。10日17时25分左右，台风中心正面袭击苍南风电场，若干叶片折断，个别塔筒折断或倒塌，损失7000万元左右（桑美台风的影响和启示，吴金成，中国风能2008年第二期）。由此可见，在热带气旋活动频繁的东南沿海，风电开发必须面对热带气旋的影响，这是中国气候与欧洲气候的最大差别。

面对沿岸风电场开发的快速增多和近海风电场开发的兴起，风机和 IEC 标准都需要适应中国的气候特点，特别是适应热带气旋影响的气候特点，风电开发商在东南沿岸和近海进行风电场开发时需要了解其极端设计风况，在风电场运行过程中需要掌握热带气旋的防范措施和科学的防御方法。本课题将针对上述问题开展一系列的研究，为电场选址和风机设计提供科学依据，为风电场正确抵御台风袭击提供基本方法和防范措施，为合理评估台风对风电场的影响提供科学方法。



1.2 研究目标和预期结果

1.2.1 研究目标

- 通过对 1961-2007 年影响中国沿岸和近海热带气旋的分析研究, 获得不同风机安全等级台风风速的出现频率和 50 年一遇设计风速, 以及台风影响下最大风向变化、风垂直变化;
- 利用中尺度模式、微尺度模式, 进行复杂地形和平坦地形下台风风速、风向和湍流模拟试验, 台风影响风电场的风场仿真方法研究, 为风电场选址和风机布局以及损失评估提供科学依据;
- 编制防台风手册, 指导风电场管理人员合理防御台风

1.2.2 预期结果

- 获得沿岸各测站和近海 50km×50km 分辨率的 WTGS 安全等级 50 年一遇设计风速, 为风机设计、风电场选址和风电场抵御台风风险提供参考;
- 得到台风影响下风向变化和风垂直变化规律, 为风电场选址、风电场管理人员合理防御台风提供科学依据;
- 建立影响中国近海风电场台风检索系统, 用户可根据需要查询热带气旋路径沿岸各台站和近海各网格点热带气旋最大风速、和 50 年一遇工程设计最大风速;
- 研究复杂地形和平坦地形下台风风速、风向和湍流特征, 台风影响风电场的风场仿真方法, 为风电场选址和风机布局提供科学依据;
- 编制风电场防台风手册, 指导风电场管理人员合理防御台风。



2 成果 1 沿岸各测站和近海 50KM×50KM 分辨率 50 年一遇设计风速计算

2.1 影响中国近海热带气旋的基本特征

2.1.1 中国近海热带气旋出现频数

使用中国气象局上海台风研究所 1961-2007 年热带气旋中心位置、气压和风速资料，对进入 15°N - 45°N，105°E - 130°E 范围内（见图 2.1）的热带气旋进行了统计，1961-2007 年间共有 579 个热带气旋进入该区域。热带气旋强度一般用热带气旋中心最大风速表示，按 WMO 最新标准（表 2.1）划分等级。由表 2.1 可见，进入研究区域台风和强热带风暴最多，频率分别占 23.7%和 21.6%，合计频率为 45.3%；超强台风和强台风频率分别占 15.2%和 12.1%，此强度的热带气旋经过风电场时常给风电场等沿海工程造成损失；热带风暴和热带低压占 27.5%，它们带给风电场的是满发。



图 2.1 研究区域图



热带气旋是否引起大陆沿海岸地区大风，与其距海岸远近有关，研究表明热带气旋 6 级风圈半径大约为 2.7~4.3 个纬距，也就是说当热带气旋在距海岸线大约 3 个纬距时，沿海区域就有可能出现由热带气旋环流引起的大风，因此进一步取离岸 3 纬距警戒区为影响大陆沿岸的统计区（图 2.1）。进入警戒区的热带气旋共 428 个，其中超强台风 34 个（7.9%），强台风 58 个（13.6%），台风和强热带风暴最多，占 59.3%，热带风暴和热带低压占 19.2%。

登陆热带气旋中，超强台风仅 5 个（1.4%），强台风 27 个（7.5%），台风和强热带风暴仍最多，占 63.7%，热带风暴和热带低压占 27.4%。说明在靠近大陆时热带气旋的强度明显减弱。

表 2.1 进入研究区域的热带气旋强度等级标准及发生频数（1961-2008）

风速（米/秒）	风力（级）	名称	15° N - 45° N, 105° E - 130° E	进入警戒区	登陆
≥51	≥16	超强台风	88	34	5
41.5-50.9	14~15	强台风	70	58	27
32.7-41.4	12~13	台风	137	144	111
24.5-32.6	10~11	强热带风暴	125	110	119
17.2-24.4	8~9	热带风暴	58	44	53
10.8-17.1	6~7	热带低压	101	38	46

2.1.2 中国近海热带气旋的路径特征

对沿海风电场来说，防御强热带气旋具有很大的挑战性，因此深入分析热带气旋移动规律对风电场安全运营具有重要的意义。

图 2.2 为进入研究区各种强度的热带气旋主要路径，可以看到，超强台风以西北太平洋生成并登陆福建沿海南部和北部为主（图 2.2a）；强台风也以西北太平洋生成的热带气旋为主（图 2.2b），常见路径有 3 条：由西北太平洋直接进入



浙江沿海或经台湾进入福建中部沿海或生成于南海登陆海南后再次登陆雷州半岛；台风强度的热带气旋，常见的移动路径也有 3 条：生成于西北太平洋并登陆粤西或生成于南海并登陆海南或从西北太平洋北上穿过台湾岛进入福建沿海(图 2.2c)；强热带风暴级别的热带气旋，既有西北太平洋热带气旋也有南海热带气旋，从西北太平洋生成的热带气旋常穿过菲律宾进入南海（图 2.2d），以登陆粤西和海南为多。

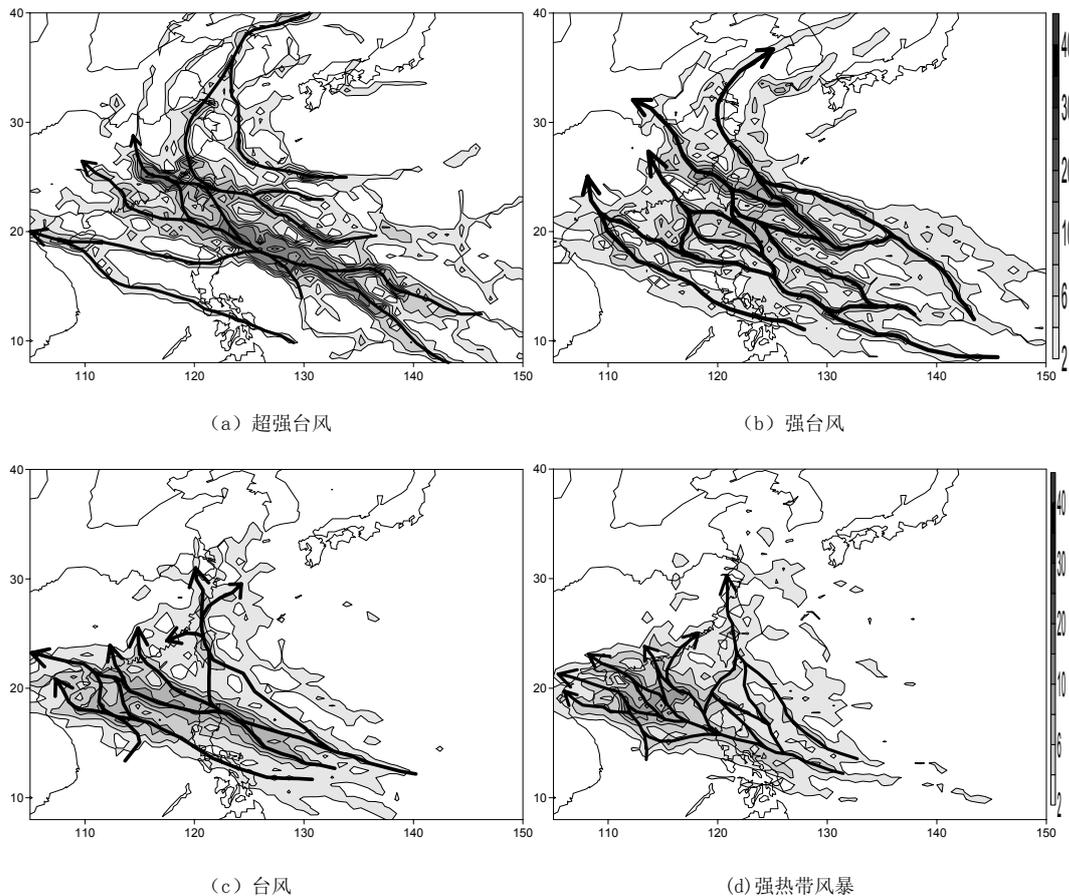


图 2.2 各种强度热带气旋主要路径

2.1.3 热带气旋登陆中国大陆沿岸的特征

以登陆前六小时内的最大风速表示登陆热带气旋的强度，按地段分为 14 个区域（见表 2.2），分别统计各种强度登陆热带气旋出现的频率。



表 2.2 各区域登陆热带气旋强度频率 (%)

区域	超强台风	强台风	台风	强热带风暴	热带风暴	合计
海南	0.54	1.61	7.26	5.65	2.96	2.15
雷州半岛	-	0.81	1.61	2.69	1.08	0.81
粤西	-	0.54	3.76	5.65	2.42	0.54
珠江口	-	0.54	2.15	1.34	1.34	0.54
粤东	0.27	0.81	4.57	5.65	1.61	1.08
闽南	-	0.54	0.81	0.27	1.08	0.54
闽中	0.27	0.27	5.11	2.69	2.69	0.54
闽北	-	0.54	1.08	2.96	0.27	0.54
浙江	0.27	1.61	2.96	2.69	0.81	1.88
上海	-	-	0.27	0.27	-	-
江苏	-	-	0.27	0.27	-	-
山东	-	-	-	1.34	-	-
辽宁	-	-	-	0.27	-	-
广西	-	-	-	0.27	-	-
合计	1.34	7.26	29.84	31.99	14.25	100

由表可见，登陆热带气旋最多的区域是海南，占全国登陆热带气旋总数的 25.81%，其中超强台风和强台风频率为 2.15%，台风和强热带风暴频率为 13.17%；其次是登陆粤西（包括雷州半岛）的热带气旋，占全国登陆热带气旋总数的 21.51%，强台风的频率为 1.35%，台风和强热带风暴频率为 13.71%。再次是登陆粤东（包括登陆珠江口）的热带气旋占全国登陆热带气旋总数的 20.43%，其中超强台风和强台风频率为 1.61%，台风和强热带风暴频率为 13.71%。

值得注意的是超强台风登陆福建中南部、浙南、粤东和海南沿海的频率较大，在风电场建设中应引起足够的重视。

2.2 使用非对称台风风场模式计算进入中国近海的热带气旋水平风场

以往获取某海域的热带气旋大风序列，一般直接挑取热带气旋经过该海域的热带气旋中心最大风速，对于一些强度强、大风半径大、在该海域旁边经过但对该海域有强烈影响的热带气旋往往被漏掉。因此，使用台风风场模式计算热带气旋行进过程中所影响范围内各网格点的大风分布，统计各网格点热带气旋大风的



变化规律。

研究表明，当热带气旋在广阔的洋面上活动，其风场分布接近于圆对称，随着热带气旋逼近陆地，风场由原来的圆对称变为非对称分布。因此，选择一个既运算方便又合理的台风风场分布模型则尤为重要。

2.2.1 非对称台风风场模型介绍

比较已有的 10 几种台风风场模型，从中挑选由胡帮辉^[2,3]等改进的非对称风场模型，该模型能较好描述非对称台风风场特性。该模型主要方程式如下：

以热带气旋中心为原点，考虑海面摩擦的热带气旋域内任意一点空气质点的平面极坐标水平运动方程组为：

$$\frac{dv_r}{dt} - \frac{v_\theta^2}{r} - fv_\theta = -\frac{\partial P}{\rho \partial r} + F_r \quad (2-1)$$

$$\frac{dv_\theta}{dt} + \frac{v_r v_\theta}{r} + fv_r = -\frac{\partial P}{\rho \partial \theta} + F_\theta \quad (2-2)$$

F_r 和 F_θ 分别为 r 方向和 θ 方向的摩擦力，假定热带气旋呈稳定状态和气压场为圆形，得到：

$$-\frac{v_\theta^2}{r} - fv_\theta = -\frac{\partial P}{\rho \partial r} + F_r \quad (2-3)$$

$$\frac{v_r v_\theta}{r} + fv_r = F_\theta \quad (2-4)$$

热带气旋域内气压场采用藤田公式，则任意一空气点处的气压和气压变化为：

$$P = p_\infty - (p_\infty - P_0) \left[1 + 2 \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2-5)$$

$$\frac{\partial P}{\partial r} = \frac{2(p_\infty - P_0)r}{R^2} \left[1 + 2 \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \quad (2-6)$$



将状态方程 $P = \rho k_c T$ 和 (2-6) 代入方程 (2-3) 中, 得到:

$$\frac{v_\theta^2}{r} + f v_\theta = \frac{A}{r} - F_r \quad (2-7)$$

$$\text{其中: } A = 2k_c T (P_\infty - P_0) \left[1 + 2 \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]^{-\frac{3}{2}} r^2 / \left\{ P_\infty - (P_\infty - P_0) \left[1 + 2 \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}} \right\} R^2 \quad (2-8)$$

当热带气旋以速度 v_s 移动时, 域内任意一点处, 静止热带气旋的曲率半径 r' 与移动热带气旋的曲率半径 r 的关系为:

$$\frac{r'}{r} = \frac{v_\theta}{v_\theta + v_s \sin \alpha} \quad (2-9)$$

$$v_\theta = v'_\theta - v_s \sin \alpha \quad (2-10)$$

$$v_r = v'_r - v_s \cos \alpha \quad (2-11)$$

其中, α 为热带气旋的移动方向与所讨论点到气旋中心连线的夹角, 逆时针方向为正。

结合 (2-4) (2-8) (2-9) (2-10) (2-11) 得到:

$$\frac{v_\theta^2}{r} + \frac{v_\theta v_r \sin \alpha}{r} + f v_\theta = \frac{A}{r} - F_r \quad (2-12)$$

$$\frac{v_r v_\theta}{r} + \frac{v_r v_\theta \sin \alpha}{r} + f v_r = F_\theta \quad (2-13)$$

其中,

$$v_\theta = v \sin \alpha \quad (2-14)$$

$$v_r = v \sin \beta \quad (2-15)$$

$$F_\theta = kv \cos(\varphi + \beta) \quad (2-16)$$



$$F_r = kv \sin(\varphi + \beta) \quad (2-17)$$

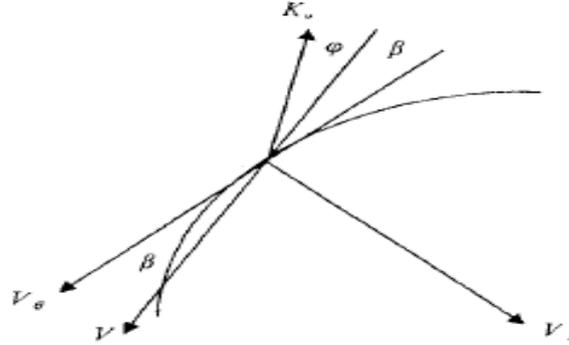


图 2.3: φ 、 β 和实际风的基本关系

将 (2-14) ~ (2-17) 代人 (2-12) 和 (2-13), 并消除 v 得到:

$$y^3 + zy + q = 0 \quad (2-18)$$

其中: $q = 2 \left[\frac{A - k^2 r^2 \cos^2 \varphi}{3kr \cos \varphi (v_s \sin \alpha + kr \sin \varphi + fr)} \right]^3 - \frac{A + 2k^2 r^2 \cos^2 \varphi}{3kr \cos \varphi (v_s \sin \alpha + kr \sin \varphi + fr)}$;

$$z = 1 - \frac{1}{3} \left[\frac{A - k^2 r^2 \cos^2 \varphi}{kr \cos \varphi (v_s \sin \alpha + kr \sin \varphi + fr)} \right]^2$$

$$y = \frac{A - k^2 r^2 \cos^2 \varphi}{3kr \cos \varphi (v_s \sin \alpha + kr \sin \varphi + fr)} + \tan \beta \quad (2-19)$$

由方程 (2-18) 得到:

$$y_1 = 2\sqrt[3]{r} \cos \theta ;$$

$$y_2 = 2\sqrt[3]{r} \cos(\theta + 120^\circ) ;$$

$$y_3 = 2\sqrt[3]{r} \cos(\theta + 240^\circ)$$

其中,



$$r = \sqrt{-\left(\frac{z}{3}\right)^2},$$

$$\theta = \frac{1}{3} \arccos\left(-\frac{q}{2r}\right)$$

根据 (2-19) 和 (2-13) 可以得到移动热带气旋的风向内偏角和风速计算公式:

$$\beta = \arctan\left[y - \frac{A - k^2 r^2 \cos^2 \varphi}{3kr \cos \varphi (v_s \sin \alpha + kr \sin \varphi + fr)}\right] \quad (2-20)$$

$$v = \frac{kr \cos(\varphi + \beta) - v_s \sin \alpha \sin \beta}{\sin \beta \cos \beta} - \frac{fr \sin \beta}{\sin \beta \cos \beta} \quad (2-21)$$

在已知热带气旋最大风速 V_{\max} 的情况下, 可以求得最大风速半径和相应的风向内偏角:

$$\beta = \arcsin\left(-\frac{b}{2a} \pm \frac{\sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}\right) \quad (2-22)$$

$$R = \frac{A_\alpha - v_s v_\alpha \sin \alpha \sin \beta}{kv_\alpha \sin(\varphi + \beta) + fv_\alpha \cos \beta} - \frac{v_\alpha^2 \cos^2 \beta}{kv_\alpha \sin(\varphi + \beta) + fv_\alpha \cos \beta} \quad (2-23)$$

其中,

$$a = A_\alpha^2 (k \sin \varphi + f)^2 + k^2 \cos^2 \varphi (A_\alpha - v_\alpha^2)^2;$$

$$b = 2kA_\alpha v_\alpha v_s \sin \alpha \cos \varphi (k \sin \varphi + f)$$

$$c = k^2 v_\alpha^2 v_s^2 \sin^2 \alpha \cos^2 \varphi - k^2 \cos^2 \varphi (A_\alpha - v_\alpha^2)^2$$

在计算中, 考虑海面的非线性作用, 摩擦系数的公式计算为:

$$k = k_s \left[1 + 7 \frac{r}{R} \exp\left(-\frac{r}{R}\right) \right].$$

台风任意方向的最大风速 (V_α) 由环流最大风速 (V'_{\max}) 和台风移速 (V_s) 两部分组成。最大环流风速与方向无关, 因此静止时任意方向的最大风速是相等的。当移动时假定所有方向最大风速的最大值 (V_{\max}) 为已知, 且方向与移动方



向相同，那么环流风速最大值可以表示为：

$$V'_{\max} = V_{\max} - V_{\alpha}$$

任意 α 方向的最大风速表示为：

$$V_{\alpha} = \sqrt{V_{\theta}^2 + V_r^2}$$

$$V_{\theta} = V'_{\max} \cos \beta - V_s \sin \alpha$$

$$V_r = V'_{\max} \sin \beta - V_s \cos \alpha$$

β 取为静止热带气旋最大风速半径处的风向内偏角。

2.2.2 计算

使用上述非对称台风风场模型，利用中国气象局上海台风研究所 1961—2007 年热带气旋中心气压和风速资料，其中 (2-8) 式中气温 (T) 1961-1977 年用英国哈得莱中心 GISST 月平均气温，1978-2007 年使用日本气象厅再分析资料中每 6 小时一次的气温资料；台风移动过程中所受到的摩擦阻力使用 25km × 25km 地形资料。最后计算得到进入中国近海 0.5°×0.5° 网格点的热带气旋风场。由于网格点较小，对于移动速度较快的热带气旋，每 6 小时计算一次往往会出现网格点没有数据的现象，因此在计算过程中进行 2 小时线性内插，得到每 2 小时的热带气旋中心气压、风速资料以及气温资料。环境气压 (p_{∞}) 与季节有关，根据不同月份海面气候平均值设定。

2.2.3 与实测风场比较

用非对称台风模型计算 2005 年 9 号台风‘麦莎’风速 (图 2.4b) 和 15 号台风‘卡努’风速 (图 2.4d)，并分别与台风‘麦莎’风场实况 (图 2.4a) 和‘卡努’风场实况 (图 2.4c) 进行比较。比较发现，图 2.4a 和图 2.4c 大风区出现在台风移动路径的右侧，并且右侧与左侧相比风力明显偏大，从图 2.4b 和图 2.4d 中也可以清楚的看到，大风区在台风移动方向右侧，且风力较左侧明显偏大，计算值与台风风场实况一致。



2.2.4 与气象站实测风速比较

选择 2007 年 9 号和 16 号台风，收集影响区域气象站的实测资料（见表 2.2 自动站观测值），利用非对称台风风场模型计算这些站在热带气旋影响期间的最大风速（见表 2.2 模型计算值），检验非对称台风风场模型的合理性。由表 2.2 可以看出，模型计算值和测站观测值比较接近，说明该模型计算结果比较理想；由图 2-5a 和图 2-5b 可以看出，模型计算的风场在近海表现为非对称性，与台风逼近大陆时表现出的非对称性相吻合，从结构上看，符合切向风速不对称性，且半月形的最大风速区位于台风右方的特点。

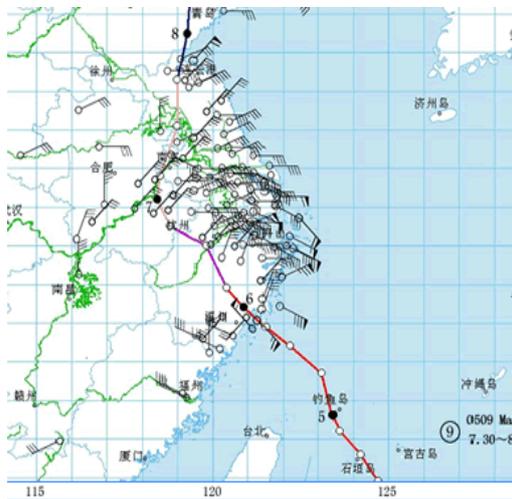


图 2.4a: 2005 年台风‘麦沙’的风场实况

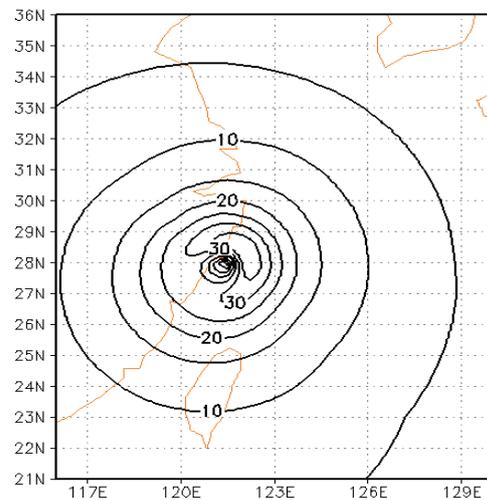


图 2.4b: 模型计算的台风‘麦沙’的风场

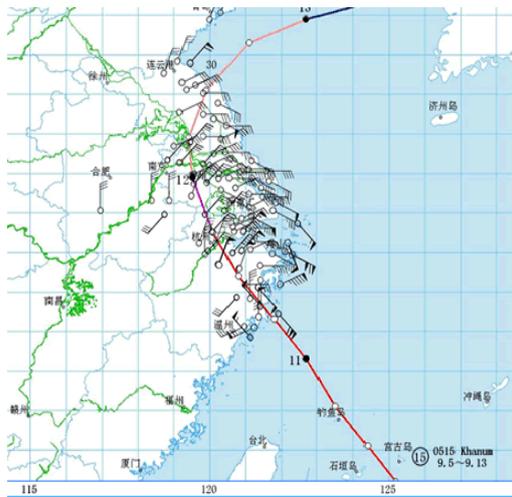


图 2.4c: 2005 年台风‘卡努’的风场实况

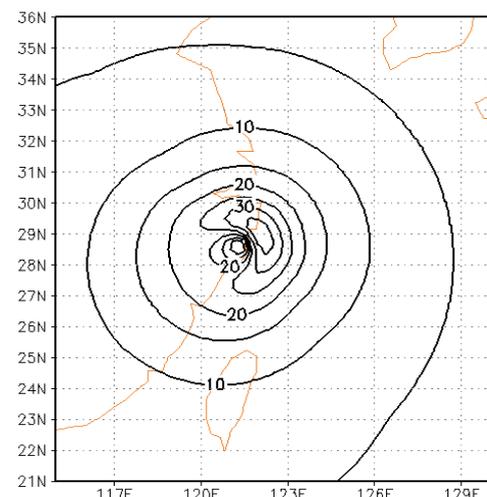


图 2.4d: 模型计算的台风‘卡努’的风场



表 2.2a: 2007 年 9 号台风风速, 模型值和观测值比较。时间: U 热带气旋 2007091812

纬度 (°N)	经度 (°E)	模型计算值 (m/s)	自动站观测值 (m/s)
26.20	119.68	19.70	17.00
25.63	119.51	25.70	30.60
26.60	119.94	14.30	12.80
26.30	119.90	16.40	17.90
25.88	116.14	10.70	10.10
26.30	119.70	16.90	17.40
26.96	120.32	11.90	8.60

表 2.2b: 2007 年 16 号台风风速, 模型值和观测值比较。时间: U 热带气旋 2007100708

纬度 (°N)	经度 (°E)	模型计算值 (m/s)	自动站观测值 (m/s)
27.24	119.94	10.60	11.80
25.09	119.12	12.60	10.90
27.38	118.10	9.20	7.30
25.40	119.60	14.80	15.20
25.25	119.36	14.10	14.10
27.23	119.88	11.60	9.90
27.28	120.03	10.70	9.80
25.72	118.10	12.10	11.10

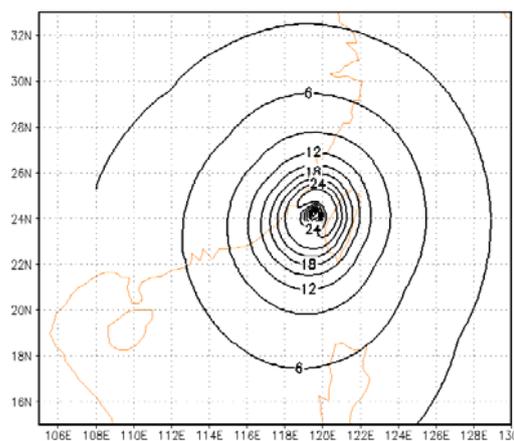


图 2.5a: 与表 2.2a 相对应的风速分布

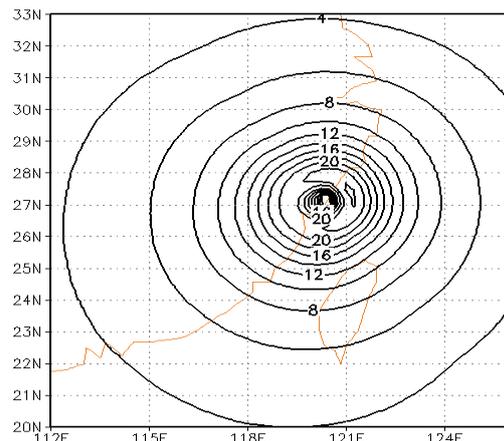


图 2.5b: 与表 2.2b 相对应的风速分布



2.3 台风影响下各网格点极端最大风速计算

为了保证风力发电机组（WTGS）的运行安全，世界标准化委员会制定了 IEC61400-1: 1999WTGS 安全要求，标准将 50 年一遇极端最大风速划分为四个级别：30、37.5、42.5、50 米/秒，极端最大风速通过概率统计推断。

再现期 T 的气候极值，实际上是指气候极值平均在 T 年内（例如 50 年，100 年等）出现一次的特定值，这个值出现的概率为 $1/T$ ，则称 T 为这个特定值的再现期。

如果特定值 x 代表某个气候要素的年最大值，则根据概率分布，求得超过这个最大值的概率：

$$P(X \geq x) = 1 - F(x) = \frac{1}{T(x)}$$

于是，最大值的再现期 T 可以由下面公式表示：

$$T(x) = \frac{1}{1 - F(x)}$$

它表明未来 T 年内工程所在区域可能遇到的极端风速荷载。

2.3.1 Poisson-Gumbel 联合概率分布模型

由于每年的热带气旋路径、强度、次数都是随机的，因此利用非对称台风风场模型计算得到的某个网格点的年热带气旋大风序列中，有的年份会有多个大风值，而有的年份可能一个都没有，因此常规概率分布模型无法计算，如韦布尔概率分布、龚贝尔概率分布需要每年一个最大风速。Poisson-Gumbel 联合概率分布则可以满足其要求。假设每年热带气旋出现次数可满足离散型分布 Poisson 分布，热带气旋影响下的最大风速可以构成连续型分布 Gumbel 分布，则 Poisson-Gumbel 联合分布可推算出当热带气旋出现频次 n 的概率分布为 P_k 的情况下，最大风速 ξ_n 的分布函数 $G(x)$ 。



假定热带气旋影响的频次 n 符合Poisson分布，记为

$$p_k = e^{-\lambda} \frac{\lambda^k}{K!}$$

式中 $\lambda = \frac{N}{M}$ ， N 为热带气旋影响总次数， M 为总年数。

假设热带气旋影响下风速服从Gumbel分布，记为

$$G(x) = \exp\{-\exp[-\alpha(x - \delta)]\}$$

由此可得Poisson—Gumbel复合极值分布的分布函数

$$F(x) = \sum_0^k p_k [G(x)]^k = \exp\{-\lambda[1 - G(x)]\} = P$$

则

$$G(x) = 1 + \frac{1}{\lambda} \ln P$$

$$\exp\{-\exp[-\alpha(x - \delta)]\} = 1 + \frac{1}{\lambda} \ln P$$

取两次对数，可得

$$\alpha(x - \delta) = -\ln\left[-\ln\left(1 + \frac{1}{\lambda} \ln P\right)\right]$$

从而得到概率为 P 的大风极值为

$$V_p = \delta + \frac{-\ln[-\ln(1 + \frac{1}{\lambda} \ln P)]}{\alpha} = \delta + \frac{-\ln[-\ln(1 + \frac{1}{\lambda} \ln(1 - \frac{1}{T}))]}{\alpha}$$

式中 $\alpha = 1.28255/\sigma$ ， $\delta = \bar{x} - 0.57722/\alpha$ ， \bar{x} 为样本序列的平均值， σ 为样本序列的标准差。

使用Poisson—Gumbel联合概率分布计算50年一遇最大风速必须满足：

I. 大风速序列中样本间具有相互独立性

II. 每年热带气旋出现频数必须符合Poisson分布，通常使用 χ^2 检验。



2.3.2 计算结果分析

Gumbel 分布要求序列中的样本值之间相互独立，为了保证每个网格点的最大风速间的相互独立性，每个热带气旋移动过程各时刻风场计算完毕后，每个网格点只取一个过程最大风速值。最终形成中国近海 0.5×0.5 经纬度网格点 1961-2007 年的热带气旋影响下最大风速序列，利用上述 Poisson-Gumbel 联合概率分布模型，对最大风速序列进行计算，得到了影响中国近海 10 米高度的 100 年、50 年、30 年和 20 年一遇极端风速分布图（图 2.6）。

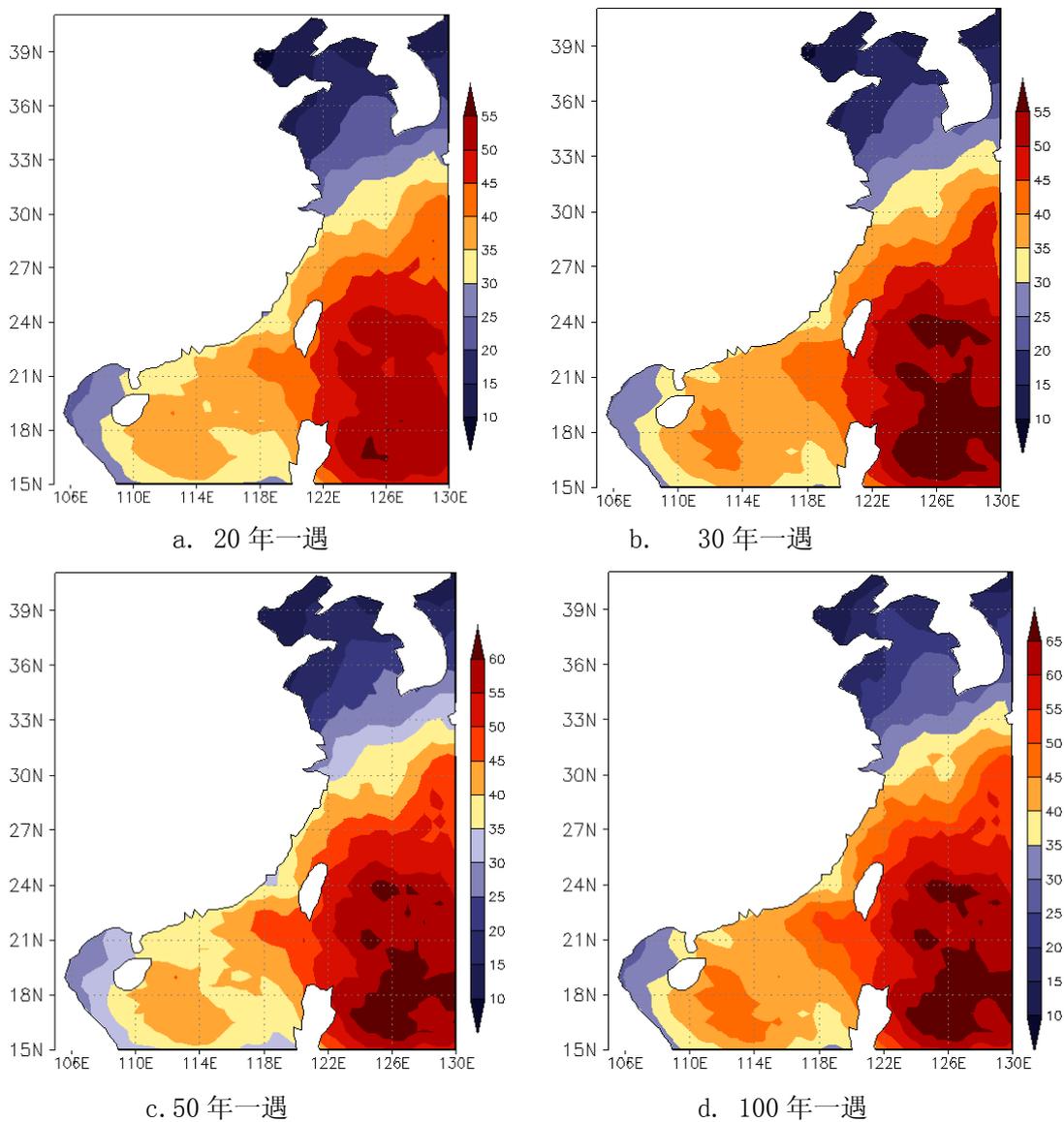


图 2.6 热带气旋影响下多年一遇最大风速 (m/s)



由图 2.6c 可以看出, 50 年一遇最大风速, 东海和黄海风速由南向北递减, 其中黄海为 20m/s -30m/s, 东海为 35m/s-50m/s; 北黄海和渤海海域由于受台风影响次数较少, 计算得到的多年一遇最大风速可信度较低, 不作详细分析。在北部湾到巴士海峡, 最大风速由西向东递增, 风速变化于 30m/s - 60m/s。

中国近岸海域是海上风电场、核电站、港口工程等近岸工程主要的开发和建设区域, 台风的影响尤为重要。50 年一遇最大风速, 江苏近海 20-30m/s, 杭州湾和长江口 30m/s-35m/s; 浙江中南部、福建北部近海, 热带气旋引起的大风最强, 40m/s-45 m/s, 福建中南部近海, 由于台湾岛对台风的阻挡和消减作用, 其受台风影响程度明显比其南北相邻海域小, 最大风速 30 m/s-40 m/s。南海北部近海, 风速大于 35 m/s, 其中海南省东南海域、广东东部近海, 受台风影响程度较其它沿海水域大, 50 年一遇风速大于 40m/s。由于雷州半岛和海南岛对台风的消弱作用, 北部湾海域 50 年一遇最大风速小于 35m/s。

图 2.6 其它图的风速分布与图 2.6c 一致, 只是数值大小有差别, 如 100 年一遇最大风速, 浙江省南部至福建省北部沿海、广东省东部沿海 40m/s-45 m/s。

2.3.3 利用 Weibull 极值分布模型计算

Weibull 概率分布是目前国际上极值计算广泛使用的方法。为了使计算结果更为可靠, 本研究同时使用 Weibull 概率分布计算每个网格点的 20、30、50、100 年一遇极值风速。Weibull 分布函数及其概率密度函数形式如下:

$$F(x) = 1 - e^{-\frac{(x-r)^m}{\alpha}}$$

$$f(x) = \begin{cases} \frac{m}{\alpha} (x-r)^{m-1} e^{-\frac{(x-r)^m}{\alpha}} & (x \geq r) \\ 0 & (x < r) \end{cases}$$

根据 Weibull 分布函数 $F(x)$, 最大值再现期 $T(x)$ 的函数形式, 便可以求出, 即

$$T(x) = \frac{1}{1-F(x)} = e^{\frac{(x-r)^m}{\alpha}}$$

从而得到概率为 P 的大风极值为:

$$V_p = (\alpha \cdot \ln T)^{\frac{1}{m}} + r$$

利用上式作最大值估计, 需要先计算参数 m, α, r 。



挑选每个网格点热带气旋影响下每年的最大风速，无热带气旋影响的年份则取此格点其它年份中的最小值代替，构成1961—2007年的47年最大风速序列，使用Weibull极值分布模型进行计算其20、30、50、100年一遇极值风速（图2.7）。

比较图 2.6 和图 2.7 可以看到，取年最大风速时间序列计算的结果与每年使用多个热带气旋影响风速组成的序列通过 Poisson-Gumbel 联合极值分布计算的结果很接近，表明 Poisson-Gumbel 联合极值分布计算热带气旋影响海区多年一遇极值风速是合理的、准确的。

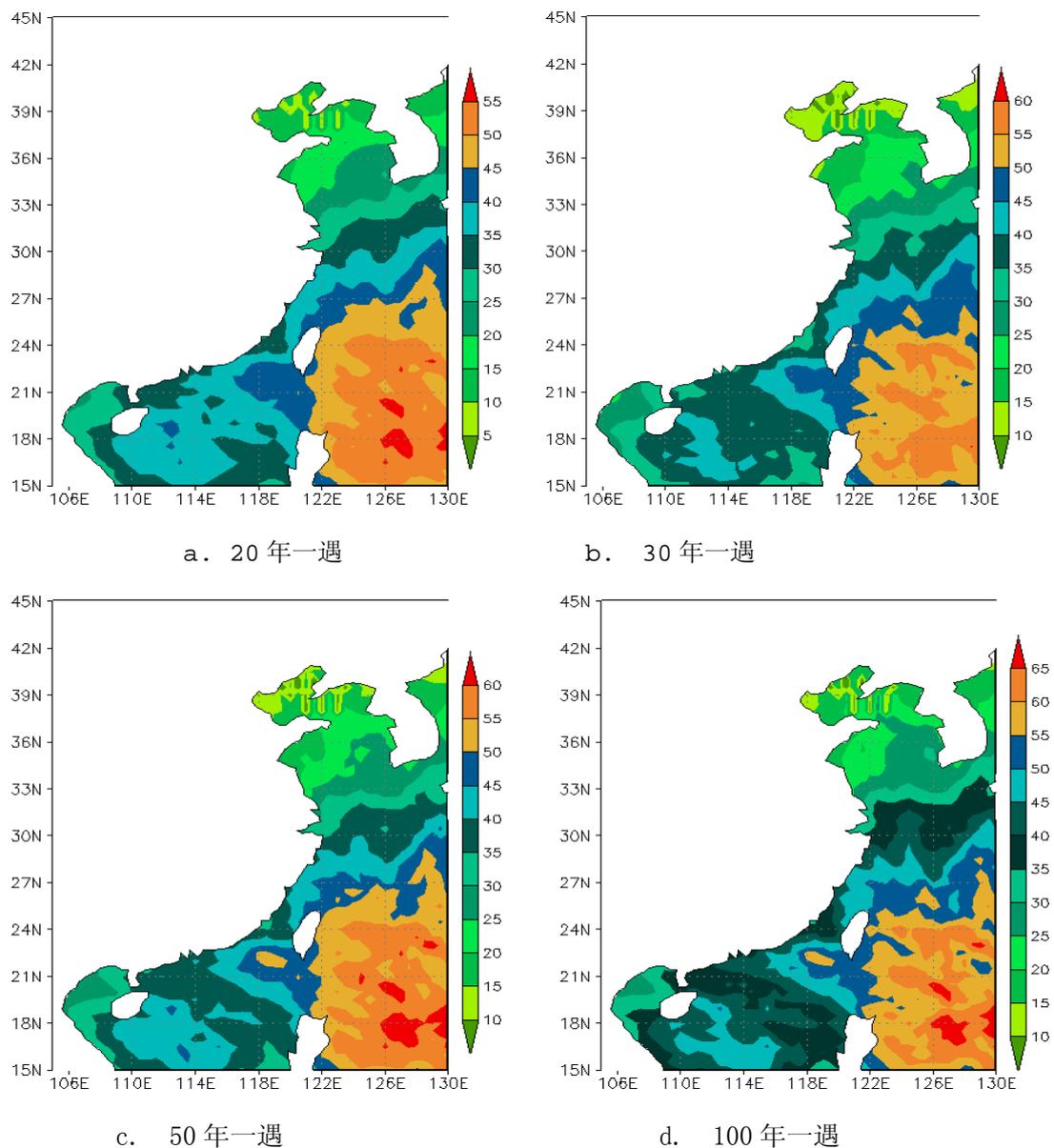


图 2.7 热带气旋影响下多年一遇最大风速 (m/s)



2.4 沿岸各测站 50 年一遇最大风速计算

沿海各气象站记录了热带气旋在中国登陆和影响期间的最大风速。上海台风研究所为项目提供了 1961~2006 年热带气旋影响期间各气象站大风（10 分钟平均最大风速）数据。使用这些数据分析了沿岸气象站有观测以来的最大风速和 50 年一遇的最大风速。

2.4.1 沿岸气象站有观测以来的最大风速分布

图 2.8 为 1961~2006 年影响中国沿海的热带气旋造成的沿岸气象站最大风速，可以看到，杭州湾以南沿海风速基本上都在 25 米/秒（10 级风）以上，以北沿海地区都在 25 米/秒以下。在 10 级风以上的区域内，福建中部沿海（除岛屿）风速明显小于其它地区。40 米/秒（13 级）以上的区域集中在珠江口以东的广东沿海和海南东部沿海。

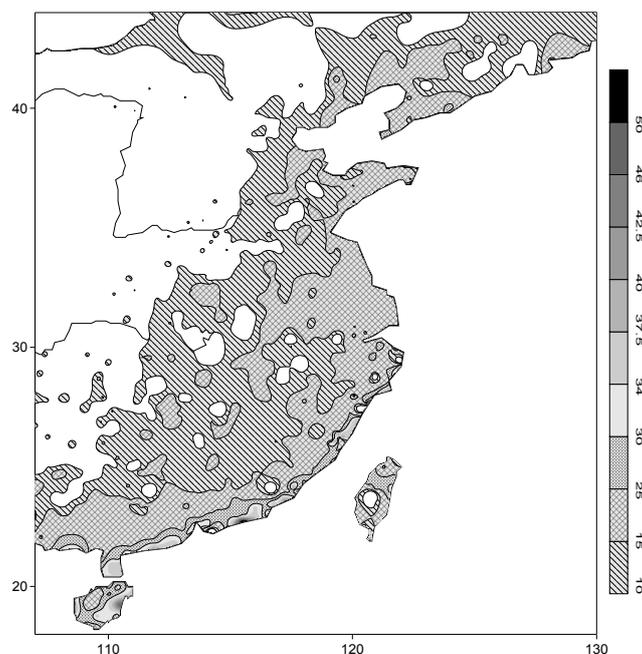


图 2.8 影响中国沿岸的热带气旋最大风速分布



2.4.2 沿岸各测站 50 年一遇最大风速

使用Poisson-Gumbel联合概率分布计算热带气旋影响下各气象站50年一遇极端最大风速。图2.9a为50年一遇最大风速分布，东南沿海地区有53.3%的台站在25米/秒以下，即大部分区域是很安全的；9.4%的台站50年一遇最大风速大于37.5m/s。最大的风速为54.0米/秒（浙江南几山），广东遮浪的51.5米/秒居次，浙江嵊山的45.0米/秒排第三。福建中南部沿海风速明显小于其它区域。

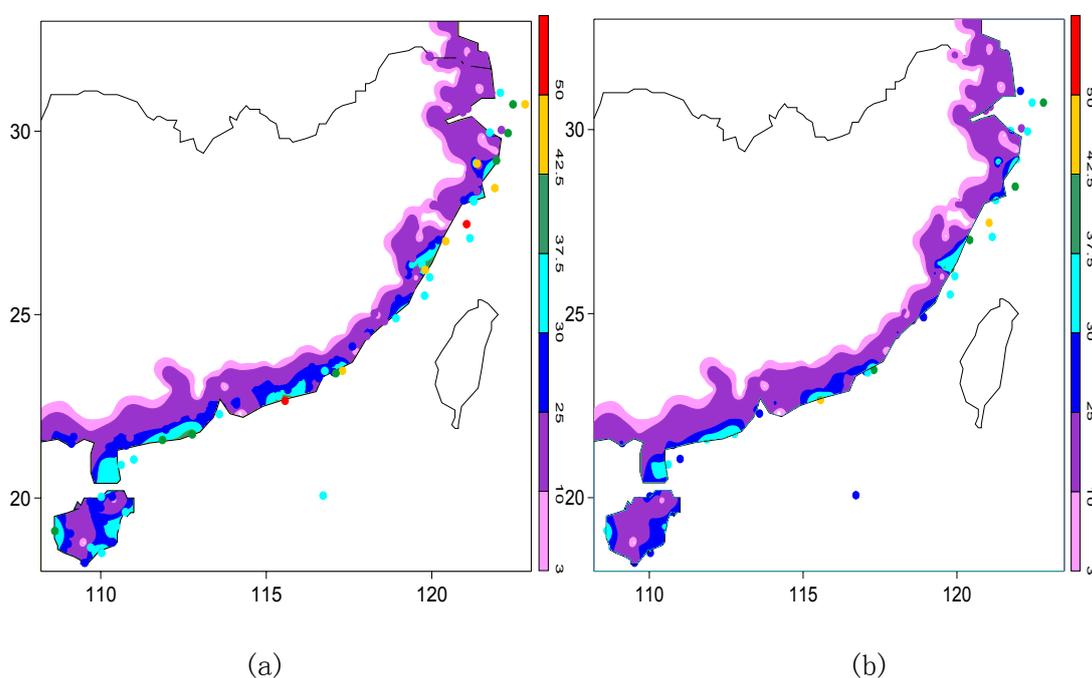


图2 20年(a)、50年(b)一遇10分钟平均最大风速

2.5 小结

- 1) 1961-2007 年间共有 579 个热带气旋影响中国近海，其中台风和强热带风暴最多，超强台风和强台风频率占 27.3%，登陆热带气旋占总数的 8.6%。
- 2) 热带气旋引起的 50 年一遇最大风速，浙江中南部和福建东北部近海、广东东部近海、海南岛东部近海 40m/s-45 m/s，福建中南部近海、广东西部近海 30 m/s-40 m/s，长江口以北小于 35 m/s。



3 成果 2：热带气旋影响下风的变化特性研究

为了最大限度地利用风场的风能资源，同时保证风力发电机组的安全运行，IEC（国际电工委员会）制定了风力发电机组系列标准 IEC61400-1，对风力发电机组进行了安全分级，轮毂高度处的年平均风速、湍流强度以及极端风况是 IEC61400-1 进行风机分类的三个主要参数，其中极端风况主要包括极端风速、极端风切变以及风速、风向的迅速变化等。利用收集到测风塔和气象站观测资料，分析了 19 个热带气旋的气压、风速风向、风垂直切变、湍流强度的变化规律；分析了 3 个代表不同强度、不同影响区域、不同移动特点的典型台风，其中 2009 年 8 号台风“莫拉克”是穿过台湾再次在福建沿海登陆并北上经浙江、江苏后入海的典型路径，2007 年 13 号超强台风“韦帕”为经过台湾北部海域直接北上登陆闽浙交界处沿海的典型路径，2005 年 18 号台风“达维”为西太平洋生成西行在海南岛中部登陆的典型路径。

利用 MM5 模式资料、卫星云图、测风塔和气象站资料分析了它们的水平风场特征，利用测风塔资料分析了不同风向、不同地形、不同下垫面、离台风中心不同距离、不同方位情况下，风速、风向、风垂直切变、湍流强度的变化特征。

3.1 测风塔数据收集处理

目前已收集到与热带气旋有关的 85 座测风塔的数据，主要源于风电企业、当地发改委和设计院、气象局。首先对测风数据进行质量检验，然后按热带气旋影响时段将涉及到的测风塔的数据进行整理，对每个热带气旋影响期间的测风塔数据进行再比较分析，剔除不合理数据，形成 17 个热带气旋数据文件。

3.2 2009 年 8 号台风“莫拉克”

“莫拉克”台风是穿过台湾再次在福建沿海登陆并北上经浙江、江苏后入海的典型路径的热带气旋。2009 年 8 月 4 日 02 时，“莫拉克”台风生成于西北太平洋上，生成后向偏西方向移动，于 7 日 23 时 45 分在台湾花莲登陆，8 日 8 时进入台湾海峡，9 日 16 时 20 分在福建霞浦北壁沿海再次登陆，登陆时中心附近最低气压 955 百帕，近中心最大风力 12 级（33m/s）。登陆后经浙江、江苏，在江苏射阳入海（图 3.1）。

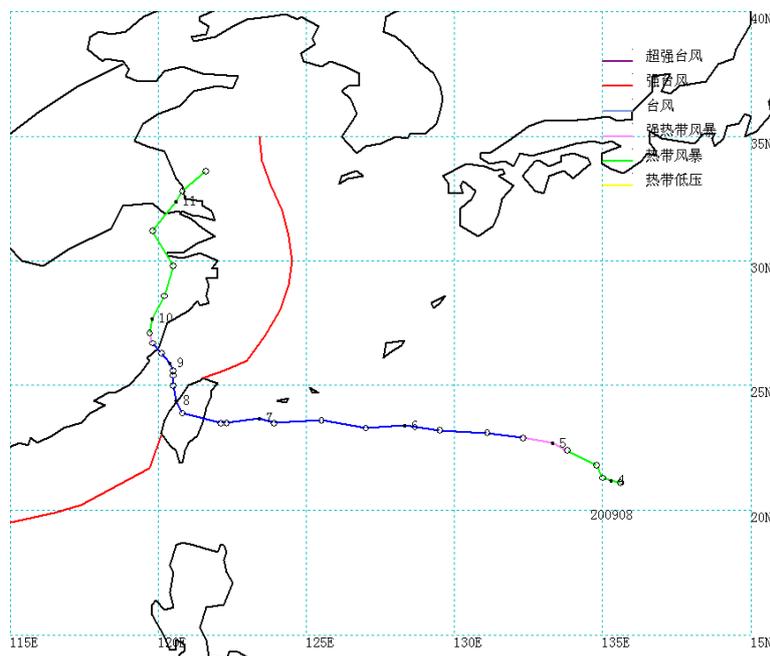


图 3.1 200908 “莫拉克” 台风路径图

3.2.1 地面和50米高水平风场分布特征

热带气旋风场是风电场如何利用和防范台风最基本的信息，在远离热带气旋危害风速范围的区域是增加风力发电的最好机会；在危害风速范围内，可以通过各种工具识别风场结构，采取有效的防御措施，将损失减少到最大限度。每个热带气旋都有其独特的地面风场结构，它不仅与台风强度有关，还与所经过的下垫面有关。在空旷的洋面上粗糙度小，风场结构是对称的，呈圆形结构。当遇到较大的岛屿和不同走向的海岸线，受地面摩擦作用，风场变的不对称，呈椭圆形结构，危险的大风区位于热带气旋移动路径的右前方，左侧范围比右侧小。

(1) 地面风场

8月7日当台风中心靠近台湾中部沿海时，广东、福建、浙江南部已被台风外围云系包围（图 3.2a），从 MM5 数值模拟结果看（图 3.2b），台风结构近似于圆形，北侧大风区远大于南侧。从大陆沿岸地区看，6 级大风区范围扩大到江苏北部和福建中部。在浙江至福建中部沿海日最大风速 15~26.8m/s（图 3.2c），风向东北，其中玉环、苍南鹤顶山最大风速超过 25m/s。



8 日, 台风穿过台湾岛并进入台湾海峡, 台风云系比 7 日松散, 表明台湾消耗了台风的能量其强度减弱, 结构近似于椭圆 (图 3.3a、b)。沿海风力加大, 江苏沿海风力 6 级, 浙江至福建沿海风力 9 级, 风向东北, 台风左右两侧都有大风区 (图 3.3c), 超过 25m/s 的站点有玉环、苍南鹤顶山、霞浦、连江、平潭、福清, 最大的风速出现在霞浦 (30m/s) 和福清东瀚 (30.1m/s)。

9 日台风结构的不对称性更加明显, 强度大为减弱 (图 3.4a、b)。受地形影响 (图 3.4c), 江苏北部和福建中部沿海风力减小, 浙江中部沿海和福建北部沿海风力继续加大, 风速多为 15~22m/s, 在台风运行路径的右侧, 大于 25m/s 的风速范围北伸至浙江石浦, 风向东北, 最大值出现在玉环 (37m/s); 在台风运行路径的左侧, 风速明显小于 8 日, 多为 20m/s 以下, 由于左侧站点最大风速出现在台风临近时, 所以越靠近台风中心的地方风向表现为东北风, 而远离台风中心, 位于更南地方的风向转为西北或西风; 在台风中心附近的霞浦东冲风速为 31m/s。9 日 16:20 分台风在霞浦北壁登陆。

10 日台风进入浙江境内, 深入内陆, 风速明显减小 (图 3.5a), 在台风路径的右前方的浙江沿海是大风区, 最大风速 17~24m/s, 风向东南~东北; 在台风后部的福建沿海最大风速 6~7 级, 风向西南; 位于台风环流北部的江苏沿海风力 6~7 级, 风向东北 (图 3.5b), 是风力发电的好时机。

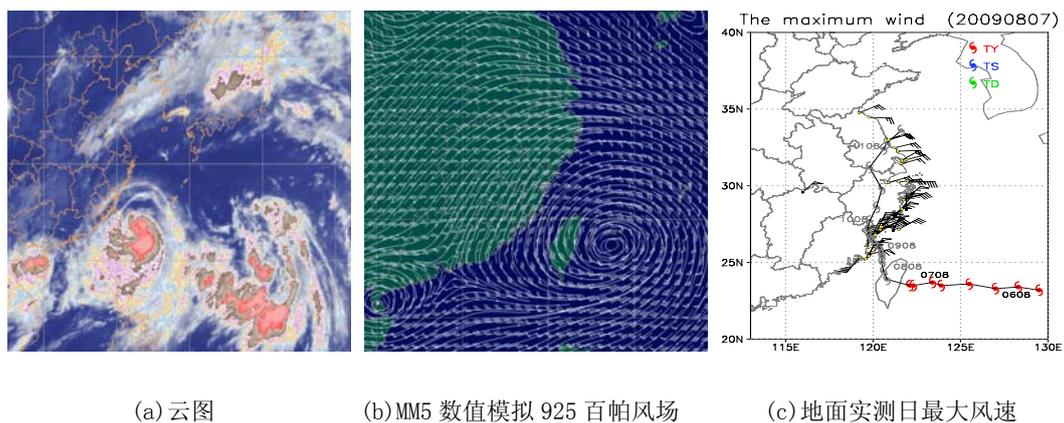


图 3.2 2009 年 8 月 7 日云图(a)、MM5(b)和实况(c)风场图

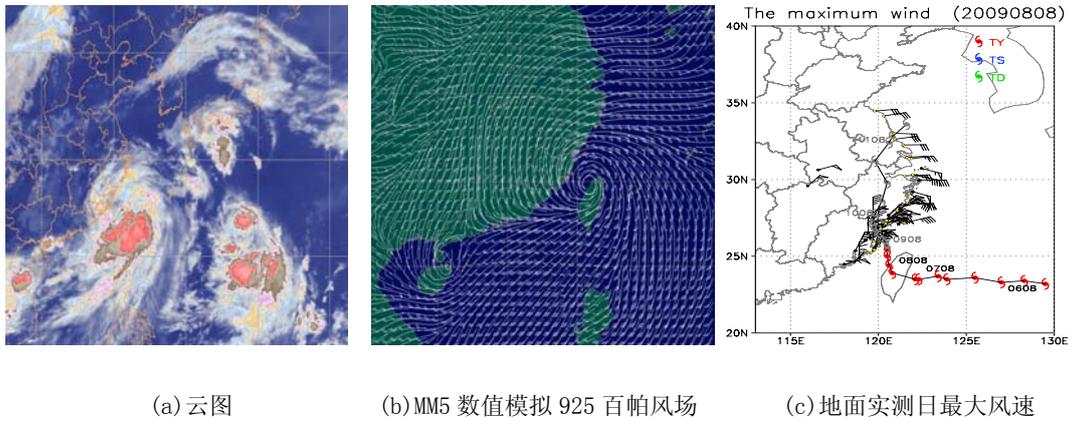


图 3.3 2009 年 8 月 8 日云图(a)、MM5(b)和实况(c)风场图

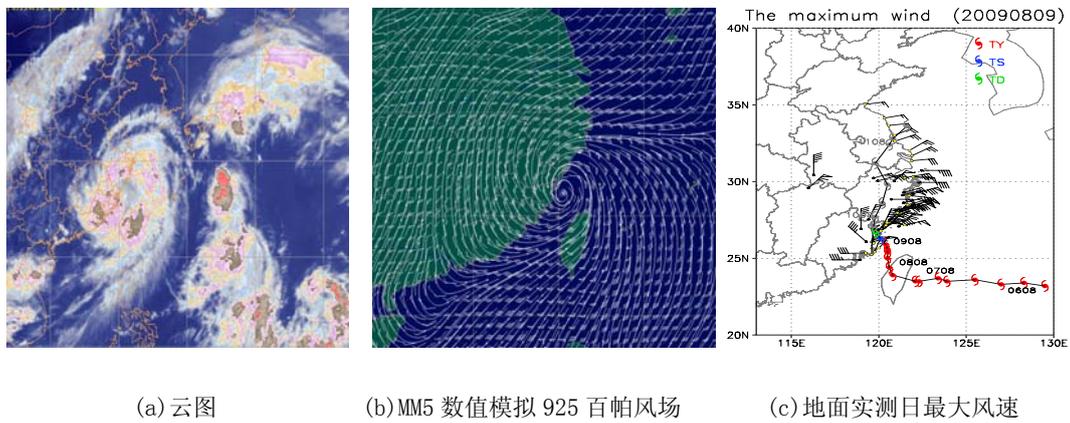


图 3.4 2009 年 8 月 9 日云图(a)、MM5(b)和实况(c)风场图

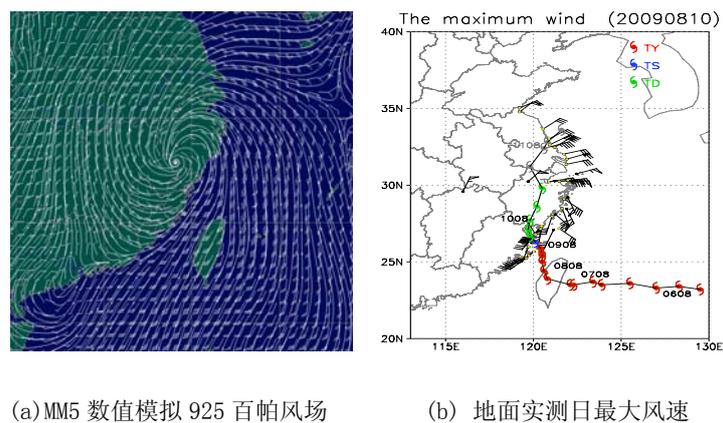


图 3.5 2009 年 8 月 10 日 MM5(a)和实况(b)风场图



(2) 50 米高风场

图 3.6 是“莫拉克”台风影响期间测风塔 50 米高风场的时间演变图，纵坐标是塔的序号，自北向南用 1~20 表示，图中每天有 4 个台风符号，分别代表 02、08、14、20 时 4 个时次，塔的空间位置和对应的站名见图 3.7。

由图 3.6 可见，在台风登陆前 6 小时 12 号塔（浙江苍南鹤顶山）以南沿海均为东北大风，说明测风塔都位于台风的左侧，台风还在海上；9 日 02 时台风往西北移动到平潭岛的纬度上，南日岛和后温风向转为西北，说明这些地方已落到了台风的后部，风速明显减小到 6 级；而在台风同纬度附近以北仍然是北~东北风。

随着台风的北上和向大陆靠近，位于台风南侧的塔风向逆时针旋转，由西北经西风转为西南风，位于台风北侧的塔风向顺时针旋转，由东北经东风转为东南风，转换时间稍早于南侧，在风向转换期间风速减小到 10m/s 以下；9 日 16:20 台风在福建霞浦北壁登陆，台风中心北南两侧附近（见 3.7 图）的东冲（15 号塔）和江田（16 号塔）持续较长时间的低风速，而再往南往北，风速开始增加，出现回南大风，南边为西南大风，北边为东南大风，北边大风范围大致延伸至宁海（8 号塔），风力可达 8 级；登陆后台风在陆地上继续北上，浙江沿海位于台风的右侧，出现较长时间的偏南大风。

分析江苏省境内的塔资料表明，台风离江苏较远的时候（8 日），风速不大，风向为东~东南；9 日台风登陆后，江苏南部风速增加到 12m/s 以上；当台风进入江苏境内（11 日），南部风速迅速减小，北部风速加大，风向变化仍然是左侧逆时针，右侧顺时针；11 日台风在射阳入海，其北侧的 1 号塔和 2 号塔风力达 8 级，风向为北~东北。南侧风速减小到 6~7m/s，风向为南~东南。

总之，位于台风路径左侧风向逆时针旋转，右侧风向顺时针旋转，风力 11 级以上。在台风即将登陆时，风向快速转换，风速减小到 6 级以下。台风登陆后，可出现 8 级的回南大风。在台风入海前，附近区域的风场表现为北部可达 8 级风，南部仅 6~7m/s。风电场技术人员可根据本场风向风速变化判断所处台风中心的方位，确定应该采取的防御和利用措施。

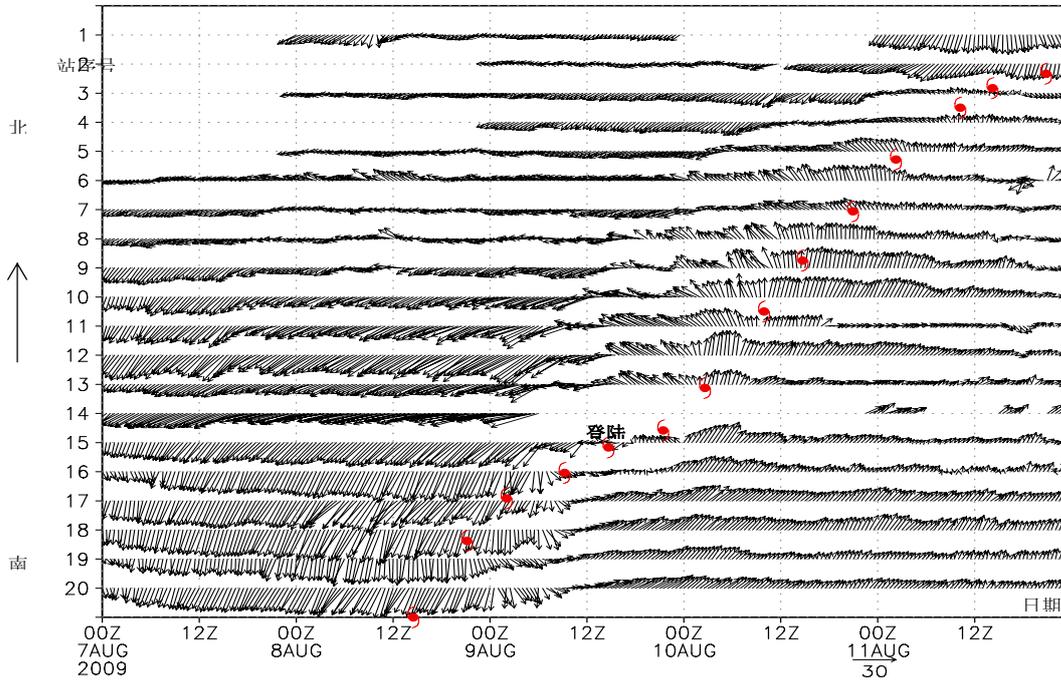


图 3.6 “莫拉克”台风 50 米高风速随时间演变图，图中圈为台风登陆时间

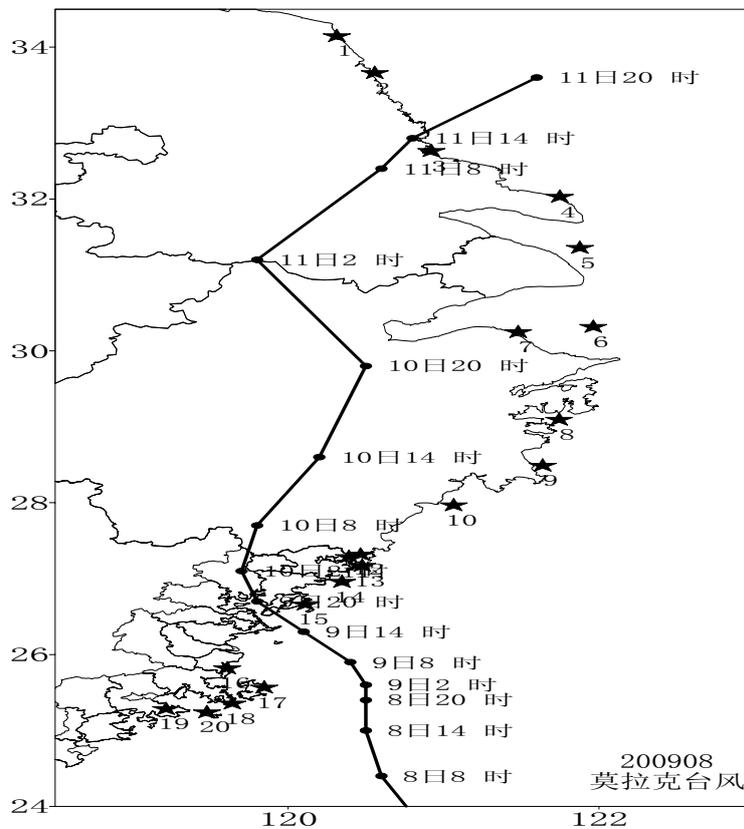


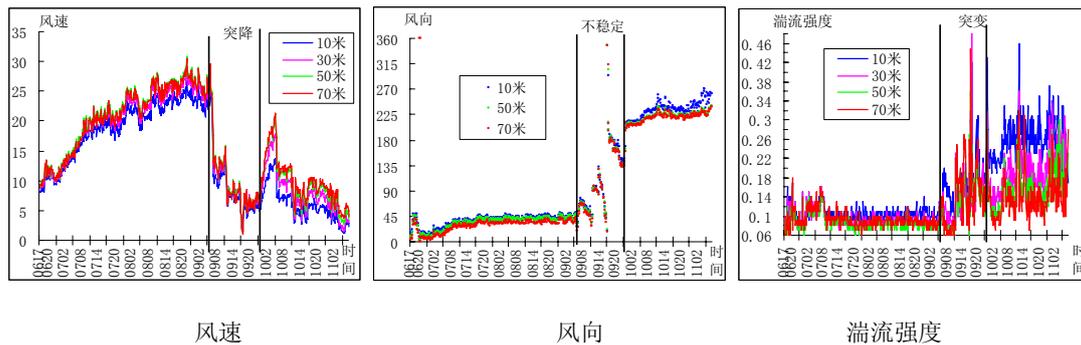
图 3.7 台风路径周围测风塔站点，图中星为测风塔，点为台风中心位置



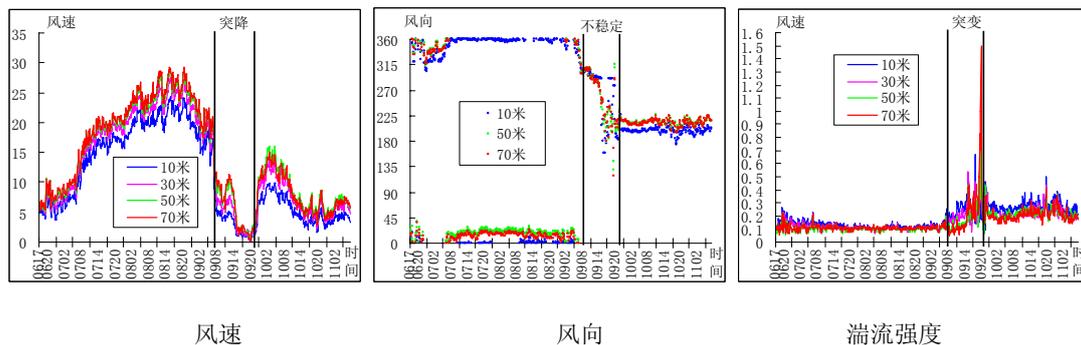
3.2.2 湍流强度

(1) 湍流强度与风向的关系

分析“莫拉克”台风影响期间，江苏、浙江、福建沿海 15 座测风资料发现（图 3.8），在台风登陆前偏北大风和登陆后的偏南风时段，风向稳定，高低层湍流强度变动不大，其量值大小取决于下垫面属性。然而在风向变化过快，风速减小期间，高低层湍流强度同时发生大小不一的突增现象，高层增量时有大于低层使得高层湍流强度值超过低层。以 70 米高度为例，当风向在短小时内（小于 6 小时）变化角度超过 45° 时，10 分钟内湍流强度会突然增加 0.1~0.5，最大的湍流强度可增加到 1.5，随后还会突然的减小，表现为忽大忽小，这种现象多发生在台风登陆前后，越靠近台风登陆点的测风塔表现的越明显（图 2.9a）。



(a) 霞浦东冲 1



(b) 长乐江田

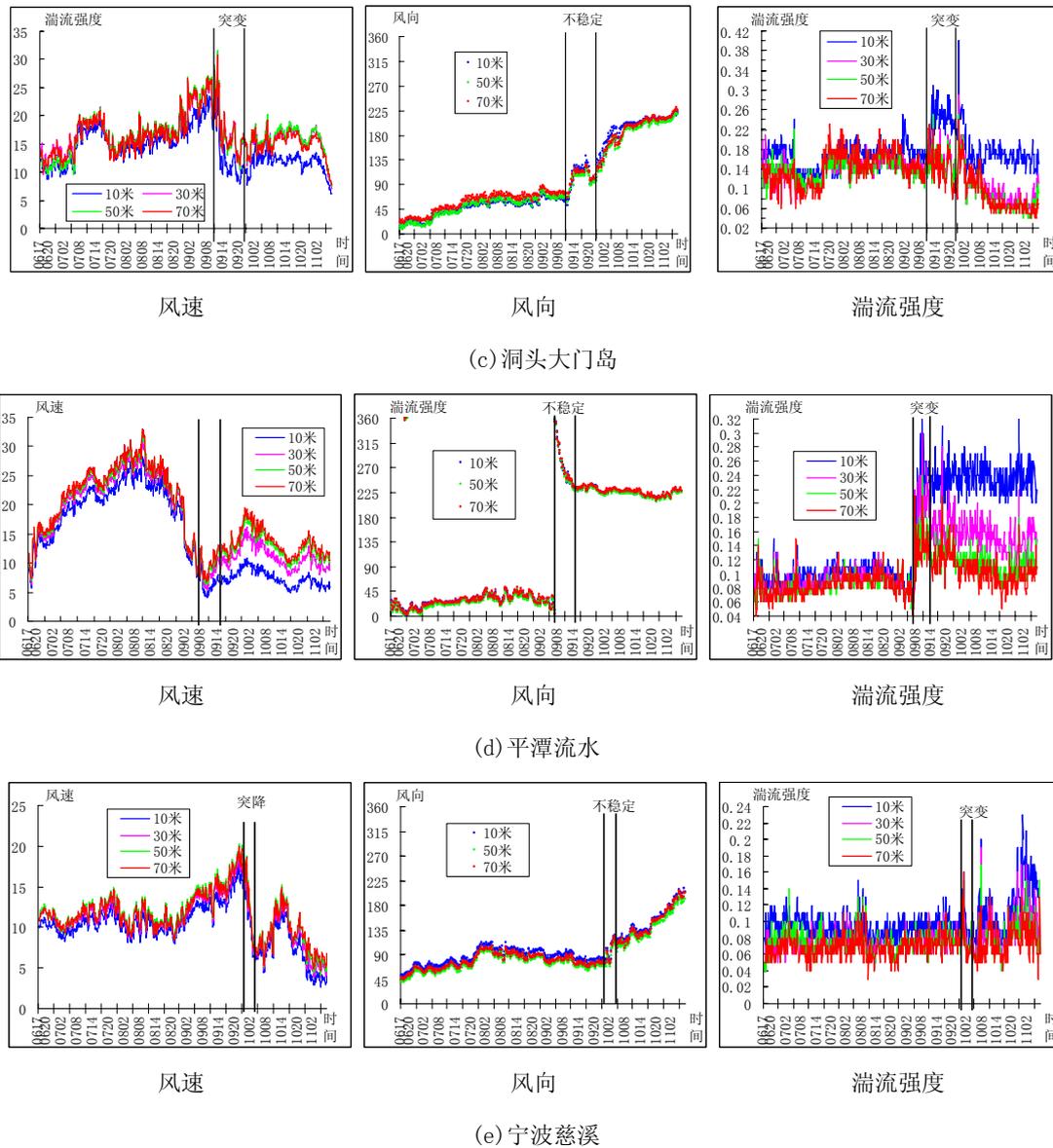


图 3.8 位于台风登陆点不同位置测风塔湍流强度与风速、风向的关系

(2) 湍流强度与下垫面的关系

湍流强度一般随下垫面的粗糙程度的增加而增大，不同的地形其增量不同。

地形平坦的沙地，如霞浦东冲、长乐江田和平潭流水（图 3.8a、b、d），在东北风期间，各高度湍流强度变化都比较平稳，并随高度减小，最大湍流强度在 0.12 左右，这是因为风是来自于海上，下垫面粗糙度小，随着风速的加大，上



下层湍流强度的差异缩小，湍流强度几乎一致；当台风靠近风向极不稳定的时候，由于下垫面性质发生了变化且不稳定，湍流强度出现了很大的波动，可超过 0.46；当风向稳定为偏南风后，湍流强度又趋稳定，风来自于陆上使低层受下垫面影响，低层湍流强度可超过 0.22，上下层差值可达 0.16，湍流强度随高度呈减小趋势。

塔附近或塔下有树木，如莆田南日岛（图 3.9a），东北风时湍流强度随高度减小，由于塔的北边有一片近 10 米高的防风林，低层风速和湍流强度都明显受下垫面影响，风速小，湍流强度量值很大，达 0.28 左右，高层却不受影响，在 0.12 左右，风速越大湍流强度越稳定；当风向不稳定时，湍流强度出现突变；偏南风时，由于塔的南面较开阔，已不受树木影响，又由于风速减小了，湍流强度表现为低层减小，高层增大，但依然遵循随高度减小的规律。

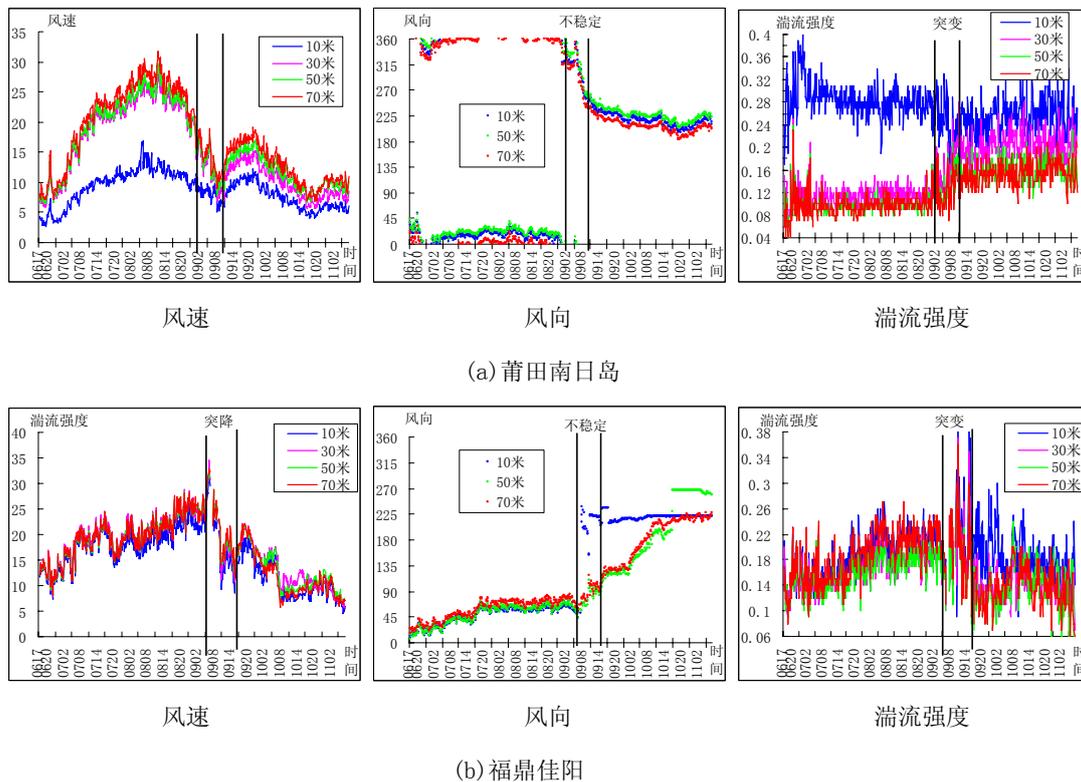


图 3.9 不同下垫面测风塔湍流强度与风速、风向的关系

丘陵山地，如福鼎佳阳（海拔 700 多米，图 3.9b），距海有一段距离，湍流强度偏北风时随风速的增大而增大，偏南风时随风速的增大而减小。其随高度变化的规律是：并不随高度减小，偏北风时高层 70 米湍流强度反而比中层 50 米大，但与 10 米高的湍流强度相当，70 米高的湍流强度超过 0.16，高达 0.26；偏南



风时 70 米高湍流强度不再与 10 米高处的相当，30 米高以上的湍流强度都很接近，且小于 10 米高。

综上所述，湍流强度的变化不仅与下垫面有关还与距台风登陆点远近有关，在台风登陆点附近风向变化极不稳定导致下垫面属性的不稳定，从而引起湍流强度的突变，高层湍流强度显得特别大，往往与风速的突降联系在一起。当风向稳定时，下垫面属性单一，湍流强度的变化取决于风速，风速越大湍流强度越小，且高低层差异减小，反之亦然。值得一提的是，在丘陵山地的地方湍流强度随高度的变化不遵循正常规律，即随高度减小的规律。

3.2.3 风速垂直切变

在台风外围的地方风切变强度只与下垫面有关，如崇明、东元、园陀角(图 3.10)；在台风登陆点附近，风速的垂直切变较为复杂，不仅与风速大小、下垫面有关，还与测风塔所处台风环流位置有关，这个位置决定了风的来向，风所经过的地形地貌直接影响到侧风塔各高度上的风速大小。这里根据不同地形和风的来向分别描述“莫拉克”台风影响期间登陆点附近的浙江南部至福建中部沿海测风塔的观测事实。

下面测风塔资料的统计结果表明，在台风登陆前风速急降期，风速较小，通常小于 12 m/s，幂指数变化有共同的特征，其变化幅度是整个台风过程的最大值，有时出现正负切变交替出现，正切变表现为突增，负切变表现为突减；在台风影响的其它时段，不同的地点则有不同的特征（表?）。

(1) 风来自海上且为沙滩地形

台风到来之前，如长乐江田、平潭流水，风向偏北，为海上风，风速垂直变化为正切变，表明风速随高度增加，幂指数大小与风速呈反相关关系，并随高度减小，上下层风速差不大，当风速超过 10m/s 时，幂指数在 0.1 左右，小于 10 m/s 时，幂指数稍大些，但不超过 0.2，上下层最大风速差 30~50 米为 3.8m/s，50~30 米为 2.1m/s，70~50 米为 0.9m/s；台风登陆后，如霞浦东冲、平潭流水，风向西南，为海上风，风速垂直变化为正切变，幂指数随高度减小，量值比偏北风



大，介于 0.3~0.4 之间，上下层最大风速差 30~10 米为 5.3m/s，50~30 米为 3.1m/s，70~50 米为 1.1m/s。

(2) 塔下及周边有树木或灌木

如福鼎嵛山岛和莆田南日岛，台风到来之前风向偏北，风速随高度为正切变，低层受下垫面影响幂指数特别大（见图 3.12），可超过 0.7，高层较小，不超过 0.1，上下层最大风速差 30~10 米为 22.8m/s，50~30 米为 13.6m/s，70~50 米为 2.1m/s；台风登陆后，风向西南，南日岛由于南部下垫面开阔，低层幂指数减小，但高层幂指数在台风环流影响下增加，幂指数介于 0.1~0.3 之间，上下层最大风速差 30~10 米为 3.8m/s，50~30 米为 2.8m/s，70~50 米为 1.7m/s。

(3) 风来自陆地

台风登陆前，如霞浦东冲塔（图 3.11），东北方向的风经过了山地，10~50 米高度风速呈正切变，50~70 米则呈负切变，最大风速层在 50 米左右的高度上，幂指数大小在 ±(0.1~0.2) 之间，上下层最大风速差 30~10 米为 2.7m/s，50~30 米为 1.8m/s，70~50 米为 -0.8m/s；台风登陆后，如长乐江田，风向转西南，风来自于陆，50 米以下风速随高度增加，50 米以上相反，导致高层为负切变，量值比台风登陆前大 ±(0.3~0.4)，上下层最大风速差 30~10 米为 3.9m/s，50~30 米为 2.9m/s，70~50 米为 -1.6m/s。

(4) 海拔较高的丘陵

如福清东瀚、福鼎佳阳和苍南鹤顶山（图 3.13），台风登陆之前，风向偏北，幂指数约 0.2~0.3 之间，风速随高度变化很不一致，30 米以上风速随高度时增时减，除 10 米外，上下层风速差不大，介于 -1.2~1.1 之间，出现负指数。台风登陆后，风向转西南，幂指数变化的幅度突然增大，幂指数在 -0.8~+0.6 之间摆动。上下层风速差大，上下层最大风速差 30~10 米为 4.7m/s，50~30 米为 -3.3m/s，70~50 米为 -3.4m/s，这是因为塔的北坡较缓，南坡陡的原因。

综上所述，台风登陆前后幂指数有一个明显的突增或突降的现象。在台风登陆点附近，当风向来自于海上时，风随高度增加，台风来临前偏北风的幂指数比台风登陆后偏南风幂指数小，不超过 0.2，偏南风的幂指数通常会比偏北风幂指数大一倍；台风登陆前后幂指数最不稳定，波动最大，出现时正时负的幂指数。当风来自于陆上时，最大风速层多出现在 50 米高度上，50 米以上为负切变，以



下为正切变，偏南风幂指数比偏北风大 2 倍。在较高的山上，主要受山体坡度的影响，台风影响前后都存在负切变，正负切变差异随坡度增大而增大。

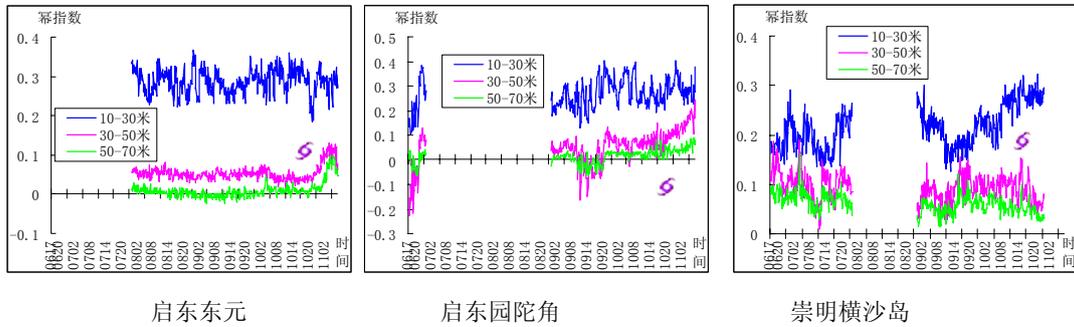


图 3.10 台风外围测风塔幂指数

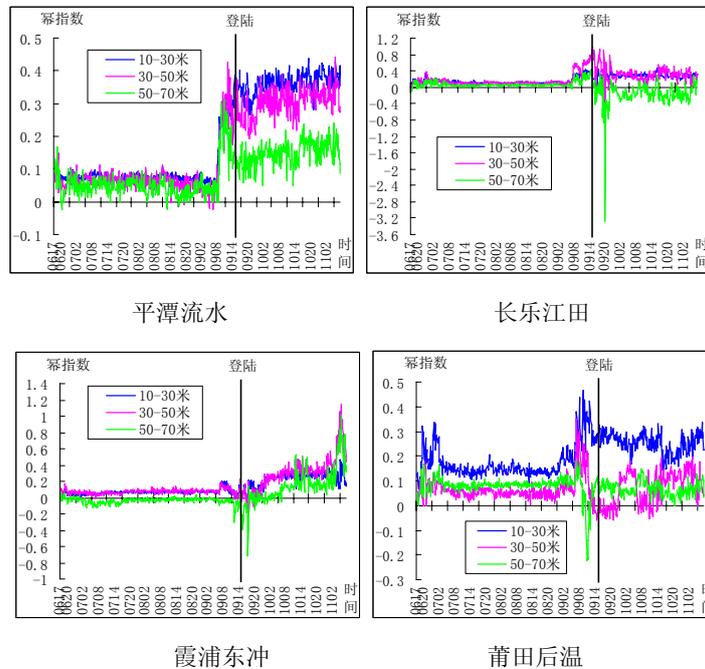


图 3.11 沙滩地貌测风塔幂指数

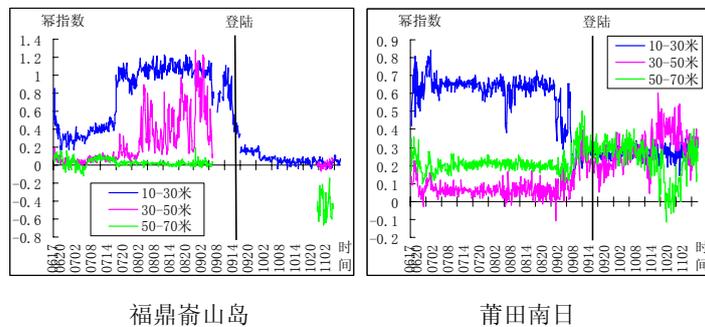


图 3.12 灌木地貌测风塔幂指数

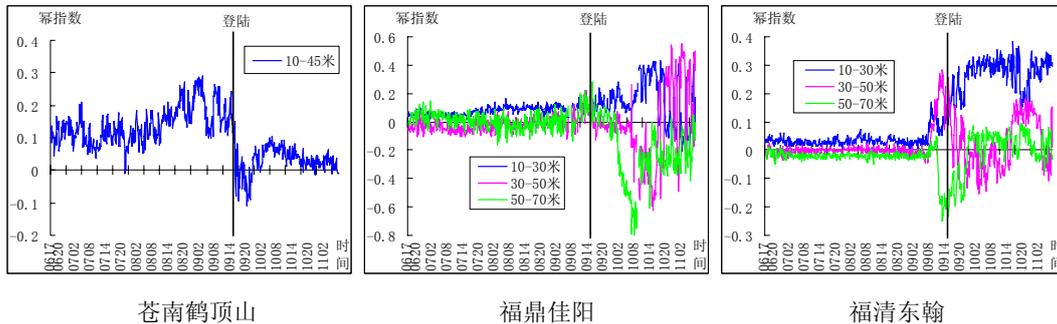


图 3.13 丘陵山地地貌测风塔幂指数

3.3 热带气旋影响下湍流强度变化规律

对收集到的 85 座测风塔资料中 19 个热带气旋个例进行统计、整理、归纳，得到如下湍流强度变化规律。

当热带气旋靠近测风塔后，随着风向的迅速转向，下垫面属性会改变，常导致湍流强度突然增大，同时伴随风速的突降。热带气旋登陆前后风速都会减小，这时湍流强度随高度并不遵守减小的规律，小风速下的强湍流风机一般都能抵抗，但当热带气旋登陆前后风速很大，在 70 米高度上伴随大风的强湍流极不利于按照现有 IEC 标准设计的风机生存，如个例分析中的韦帕台风，200513 号登陆福建莆田的“泰利”台风（图 3.14）和 200709 “圣帕”台风（图略）。

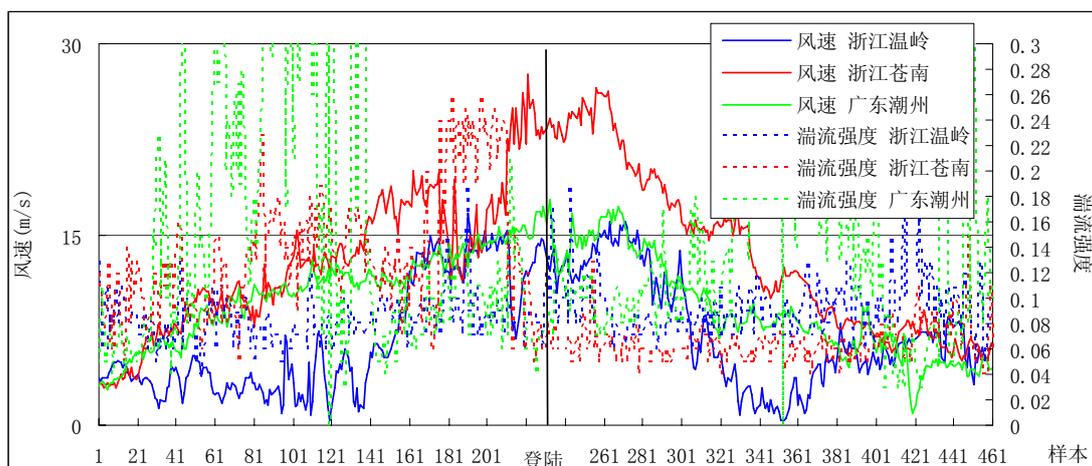


图 3.14 200513 “泰利”台风两侧 70 米高测风塔风速和湍流强度时间演变图



威胁风机安全的是风速较大 30 米高度以上湍流强度变化，在此分析 15~25m/s（风机额定风速段）和 $\geq 25\text{m/s}$ （风机切出风速段）种风速条件下，偏南和偏北风湍流强度特征。

当 70 米高度上风速达到 15~25m/s 时，风机处于工作状态，强的湍流强度将影响风机的使用寿命。将 19 个热带气旋个例按南、北风分别进行统计，发现平均湍流强度随高度减小，30~40 米以下减小速率大，以上减小较缓慢(图 3.16, 3.17)；低层受地面影响，湍流强度大，有 56%的塔 10 米高湍流强度超过 0.2，最大可达 0.37（福建东山澳角南风）；有 47%的塔南、北风流强度随高度变化曲线比较靠近，有 44%南北风相差很大，其余以 30 米高度为界，以下南风明显大于北风，以上相反。南北风相近时多数塔南北风的湍流强度随高度变化曲线在 20~40 米高度上形成交叉点，且交叉点以上高度的湍流强度基本上小于 0.16。南北风相差大时，若北风湍流强度大于南风，南风通常小于 0.16（图 3.16），北风有时整层在 0.24~0.28 之间（福建霞浦下浒），对风机影响很大；若南风湍流强度大于北风，通常 30~40 米高度以上南、北风的湍流强度都小于 0.16，但有时整层南风介于 0.16~0.36 之间（图 3.17）。

这一风速段的湍流强度极值都超过了 IEC 强湍流等级 0.16，其中地形复杂的山地（福鼎沙埕台峰、霞浦下浒）70 米高最大可达 0.28 以上；偏北风与偏南风湍流极值比较接近（图 3.15）的约占 32%，偏北风湍流极值比偏南风大的（图 3.16）约占 32%，偏北风湍流极值比偏南风小的（图 3.17）约有 16%，且 40m 以下更明显。另外，测风塔位于热带气旋的北边其湍流强度比位于南边的测风塔强，当塔位于热带气旋中心附近时，偏北风的湍流强度要比偏南风大。

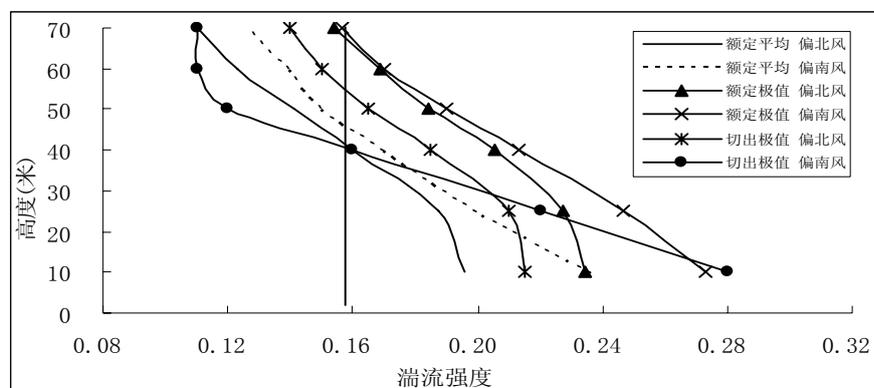


图 3.15 福建莆田平海不同风速段湍流强度

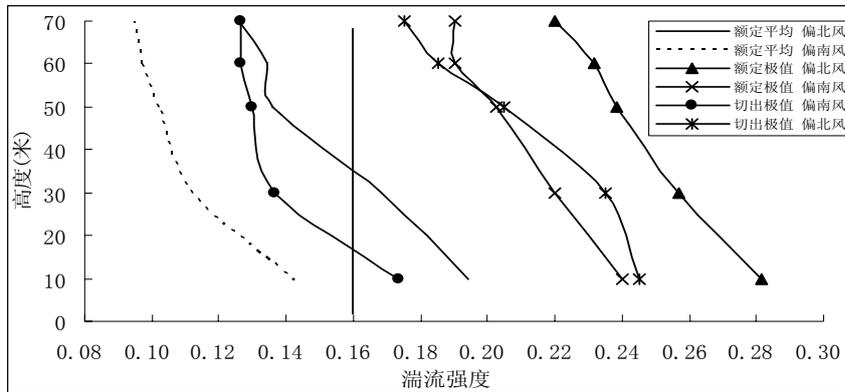


图 3.16 浙江苍南不同风速段湍流强度

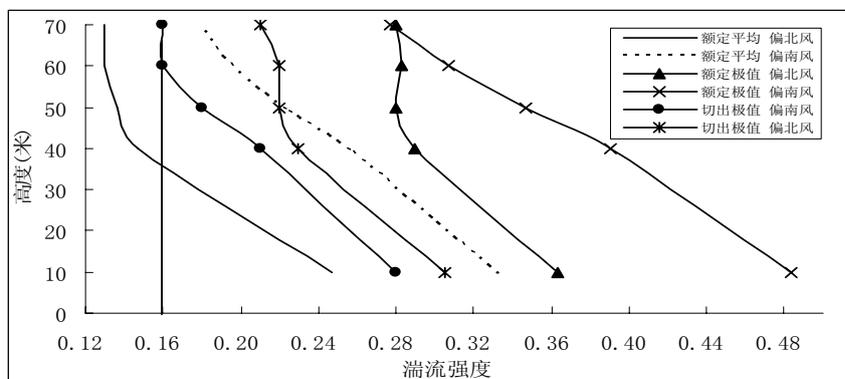


图 3.17 福建福鼎沙垵台峰不同风速段湍流强度

当 70 米高风速达到 25m/s 以上时，约 87%湍流强度的极值较 15~25m/s 时小，个别偏北风会情况下会出现与 15~25m/s 时湍流强度的极值(见图 3.18)。

25m/s 以上湍流强度的极值随高度的变化特征是：10m~70m 比较接近的仅有 3 个，其中偏北大风 2 个，偏南大风 1 个；绝大多数 40m 高度以上湍流强度的极值较接近，40m 米以下比 40m 以上大，其中偏北大风情况下 40m 与 10m 极值湍流强度差 0.02-0.04 占 57%，0.05-0.10 占 29%，大于 0.10 占 14%；偏南大风情况下 40m 与 10m 极值湍流强度差 0.02-0.04 占 43%，0.05-0.10 占 36%，大于 0.10 占 29%。

偏南大风与偏北大风湍流强度极值比较，偏南大风大于偏北大风 3 次（如图 3.19），偏南大风小于偏北大风 2 次（如图 3.16 和图 3.17），40m 高度以上偏南大风小于偏北大风而 40m 以下则相反图 3.15），这种不均匀的湍流强度变化对风机将产生不利影响。

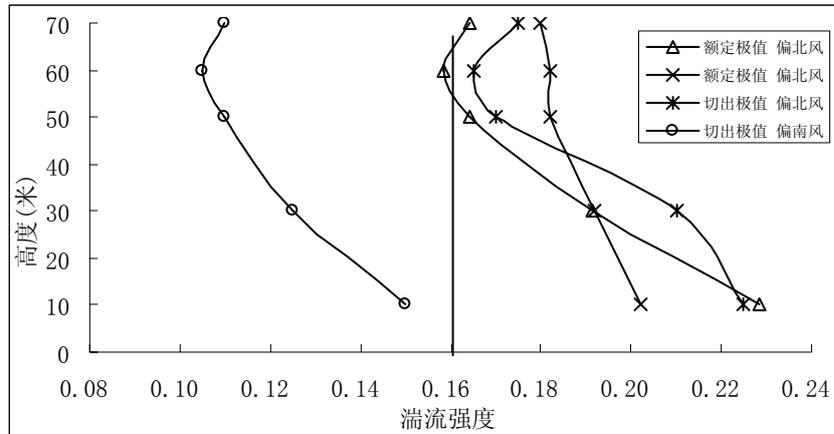


图 3.18 浙江温岭不同风速段平均湍流强度

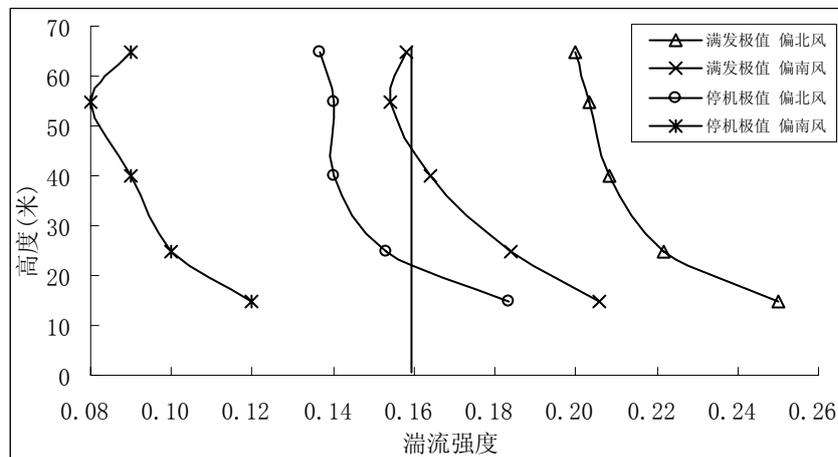


图 3.19 福建平潭先进村不同风速段极值湍流强度

3.4 热带气旋影响下风速垂直切变规律

根据收集到的 85 座沿海测风塔资料统计分析了 10-70 米风速垂直切变，发现风速 15-25m/s 和 $\geq 25\text{m/s}$ 均为正的切变指数，但不同的地形条件下指数大小差异很大：在平坦的海滩上，切变指数值为几种地形条件中最小，平均切变指数 0.11~0.20 之间，10 分钟指数极值可达 0.11~0.33（见表 3.1 浙江温岭和福建平潭），北风切变指数大于南风；在海拔 100 米以上的山地上，如表 3.1 中福建福鼎沙垵台峰、东山澳角和广东潮州拓林镇，受地形坡度影响，指数可超过 0.6；海边地势较低的地方，塔的周围有树木和灌木，如表 3.1 的福建连江北茭和海南澹州峨蔓龙门，平均指数介于 0.24~0.45 之间，10 分钟指数极值可达 0.27~0.94。由此可见，热带气旋影响期间，同样地形条件下，台风垂直切变指数都大



于国标 GB50009-2001 规范，且有明显的风向差异。

分析了各高度之间的切变指数发现, 有的塔在 60~70 米或 50~70 米高度上存在负切变现象 (表 3.2), 表明在热带气旋影响期间某些地方不完全服从指数规律。从表中还可看出, 沿海低丘 10-30 米或 10-40 米之间的切变指数很大, 50-70 米切变指数相对减少, 其它地形则差别相对较小。另外从本章 3~5 节典型个例分析可知, 热带气旋靠近或登陆前后, 风向风速很不稳定, 导致了切变指数的不稳定, 大的正、负切变指数多出现在此时段。



表 3.1 典型地形下的 70 米高度以下风速垂直切变

塔名	环境	海拔	风速段	风向	平均整层幂指数	整层幂指数极值
浙江温岭	滩涂	8	15-25m/s	偏北风	0.17	0.28
				偏南风	0.14	0.27
			≥25m/s	偏北风	0.20	0.33
				偏南风	0.14	0.22
福建平潭	海滩	30	15-25m/s	偏北风	0.19	0.29
				偏南风	0.15	0.3
			≥25m/s	偏北风	0.16	0.23
				偏南风	0.11	0.11
福建福鼎沙埕台峰	丘陵山地	267	15-25m/s	偏北风	0.24	0.43
				偏南风	0.30	0.44
			≥25m/s	偏北风	0.22	0.36
				偏南风	0.24	0.32
福建东山澳角	沿海小山		15-25m/s	偏北风	0.80	0.91
				偏南风	0.67	0.9
			≥25m/s	偏北风	0.66	0.7
广东潮州拓林镇	丘陵	107	15-25m/s	偏北风	0.29	0.58
				偏南风	0.40	0.64
			≥25m/s	偏北风	0.34	0.49
				偏南风	0.31	0.51
连江北茭	沿海低丘	50	15-25m/s	偏北风	0.36	0.83
				偏南风	0.45	0.94
			≥25m/s	偏北风	0.43	0.75
海南澹州峨蔓龙门	平原	23	15-25m/s	偏北风	0.34	0.68
				偏南风	0.34	0.47
			≥25m/s	偏北风	0.24	0.28
				偏南风	0.25	0.27



表 3.2 各高度风速垂直切变指数

塔名	环境	海拔	风速段	风向	高度 (米)						
					10 - 30	30 - 50	50 - 60	60 - 70			
浙江温岭	滩涂	8			10 - 30	30 - 50	50 - 60	60 - 70			
			15-25m/s	偏北风	0.20	0.14	0.16	-0.02			
				偏南风	0.14	0.15	0.12	0.14			
			≥25m/s	偏北风	0.25	0.18	0.15	-0.08			
				偏南风	0.14	0.15	0.10	0.16			
			连江北茭	低丘	50			10 - 40	40 - 50	50 - 60	60 - 70
15-25m/s	偏北风	0.43				0.13	0.02	0.21			
	偏南风	0.57				0.10	-0.09	0.06			
≥25m/s	偏北风	0.52				0.13	0.05	0.23			
霞浦西洋岛	小海岛	39						10 - 40	40 - 50	50 - 60	60 - 70
						15-25m/s	偏北风	0.08	0.16	0.16	0.00
			偏南风	0.31	0.03		0.30	-0.12			
			≥25m/s	偏北风	0.08	0.02	0.02	-0.13			
			海南文昌41	海边	5			10 - 30	30 - 50	50 - 65	65 - 70
						15-25m/s	偏北风	0.22	0.11	0.11	-0.14
偏南风	0.14	0.10					0.19	-0.61			
≥25m/s	偏北风	0.13				0.09	0.11	-0.27			



4 成果 3: 建立影响中国近海风电开发热带气旋检索系统

4.1 影响中国近海风电开发热带气旋检索系统结构

影响中国近海风电开发热带气旋检索系统共分 3 个子系统, 分别是热带气旋路径、统计特征、极值风速 (见图 4.1)。热带气旋路径子系统中又分为各月热带气旋路径、不同强度热带气旋路径、不同登陆地区热带气旋路径。统计特征子系统分为影响中国近海不同热带气旋强度发生频数、不同区域登陆热带气旋强度出现频率。极值风速子系统分为影响中国沿岸的热带气旋极端最大风速分布、影响中国沿岸热带气旋多年一遇最大风速分布、影响中国近海的热带气旋极端最大风速分布、影响中国近海热带气旋多年一遇最大风速分布。

4.2 检索系统技术要求

系统以 windows 为操作系统平台, 选择 visual basic 6 为程序开发语言, SuperMap 为 GIS 系统平台, access 为辅助数据库系统。在文档输出时, 采用 VB for Application 技术, 调用 word 提供的编程接口, 实现对文档生成的全程自动控制。

4.3 检索系统功能

软件实现了从热带气旋数据实时和批量更新、路径查询和统计图表查询自动实现。系统主要包括数据管理、路径查询、统计图表查询、输出和帮助五个功能模块。各功能模块详细说明如下:

4.3.1 数据管理模块

提供了台风数据实时和批量更新功能。实时更新子模块从地面测站电码报和台风路径报文中解码, 并将路径信息添加至 GIS 平台的附属数据库。批量更新子模块用于经审核的路径信息或每年新增的路径信息覆盖掉往年监测获取的未审核信息或增加信息。

4.3.2 热带气旋路径查询模块

提供了空间查询和属性查询两个子模块。空间查询可以用任意圆、任意矩形、



任意多边形、定点圆、定点矩形查询进入定义区域的台风；属性查询提供了一个筛选条件构造器,用户可以自由生成一个相当于 SQL 语句中的 Where 子句字符串,从而得到想要查询的台风。

在界面的显示上,提供了放大、缩小、全景、自由移动、鼠标中键无级缩放等功能;在状态栏自动显示鼠标所在经纬度信息、在路径属性查询状态下通过点击路径线在状态栏显示该台风的台风名、最大风速、最低气压等信息;还可以通过图层控制器自由选择各图层的可见与否、颜色、线条样式等。

4.3.3 统计特征查询模块

提供了项目统计分析得到的影响中国近海不同热带气旋强度发生频数、不同区域登陆热带气旋强度出现频率、登陆频数强度、典型台风过程等图形、表格、文字表述等查询功能。

4.3.4 极值风速模块

提供了项目计算分析的海上、陆地热带气旋极端最大风速,100 年、50 年、30 年、20 年、2 年最大风速查询功能

4.3.5 输出模块

主要提供当前图形界面的保存功能、保存当前显示的等值线、根据选择的图形文字进行打印功能。

4.3.6 帮助

提供了系统的操作说明,包括系统安装、目录结构、输入输出文件、各个子模块的具体操作说明等。

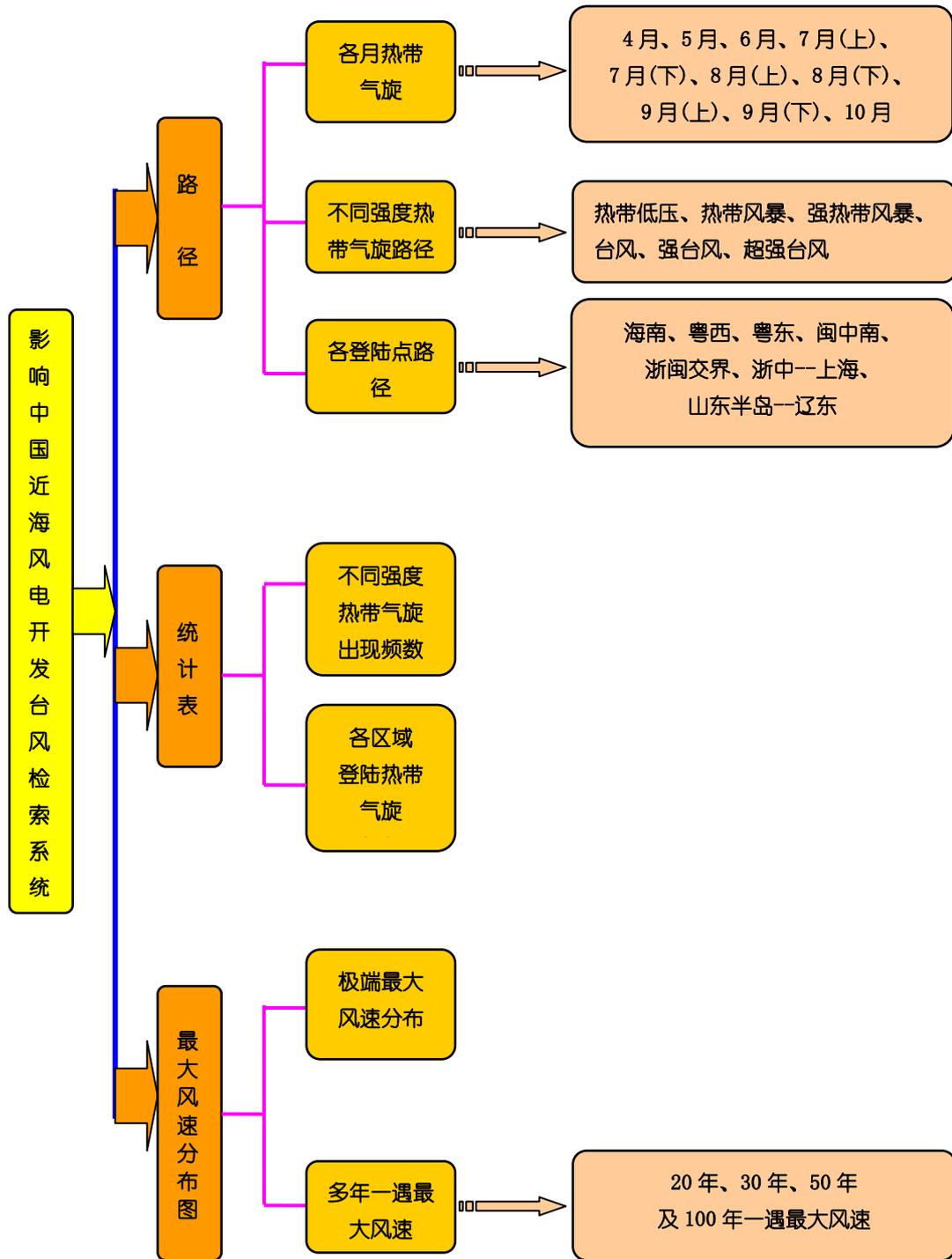


图 4.1 影响中国近海风电开发热带气旋检索系统框架图



4.4 影响中国近海风电开发热带气旋检索系统使用说明

影响中国近海风电开发热带气旋检索系统使用说明分 5 部分：

4.4.1 功能及特点

系统具有热带气旋数据实时和批量更新、路径查询和统计图表查询功能，包括数据管理、路径查询、统计图表查询、输出和帮助五个功能。系统以图形、表格、文字方式显示查询结果，操作界面友好，提供了安装程序和帮助文件。系统的特点是利用 GIS 平台的可开发组件，实现了台风路径的精确时空查询。

4.4.2 系统软硬件要求

硬件要求：计算机 CPU 主频 3G 以上，内存 1G 以上，硬盘 80GB 以上，15 吋以上彩显。必要时可配各种常用的黑白或彩色打印机。

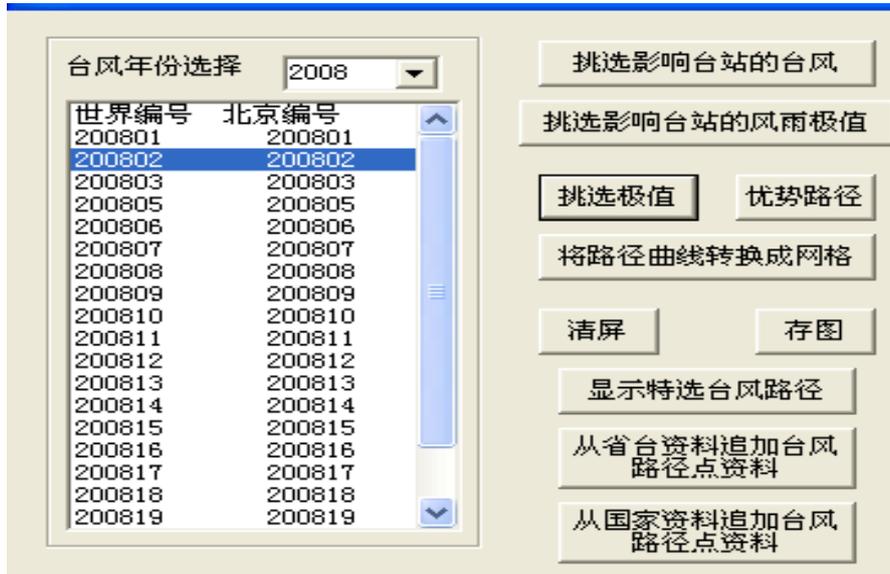
软件要求：操作系统 Windows 2000/XP，GIS 平台 SuperMap

4.4.3 操作说明

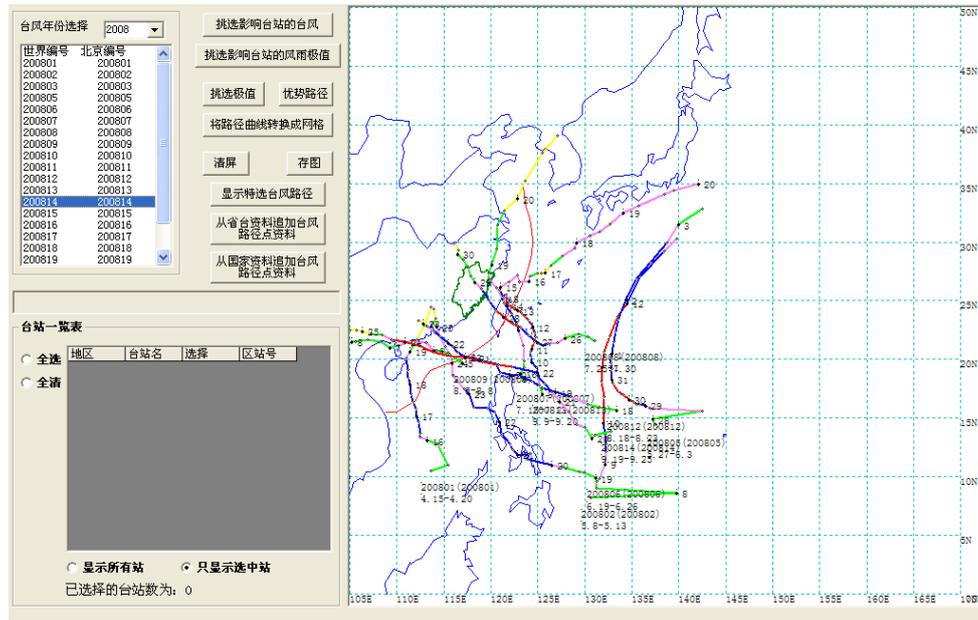
软件采用了常用的主窗口——子窗口结构，可以通过主菜单使用软件的所有功能，对部分频繁使用的功能，提供了工具栏快捷方式。下面介绍系统主要界面：

(1) 资料追加和路径检索界面

- 年份选择（1949-2008 年）
- 每年有编号（国际编号和中国编号）热带气旋路径、风速极值选择
- 存图和清屏选择
- 资料追加

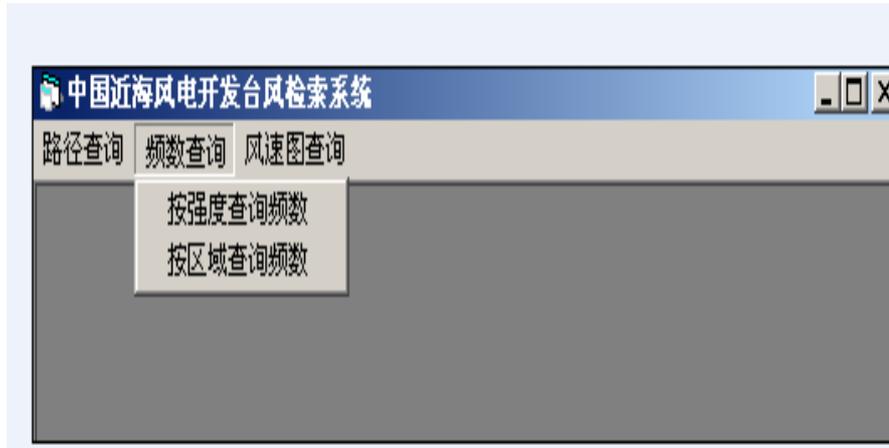


(2) 利用编号菜单, 查询需要的任意一条或若干条热带气旋路径及相关信息。





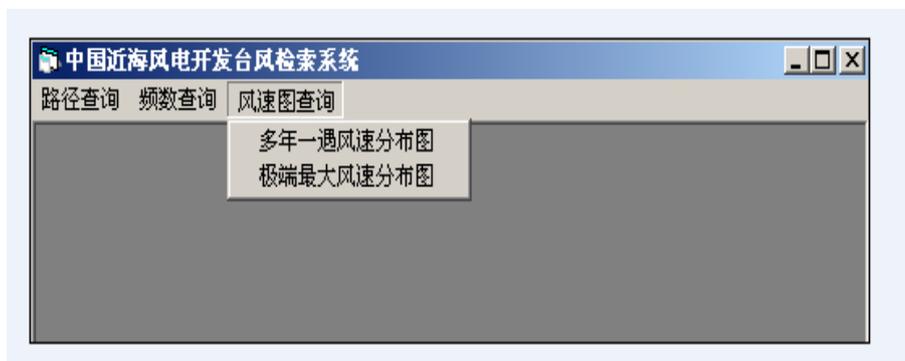
(3) 统计特征子系统界面



点击频数查询按钮可查看如下表的统计表格

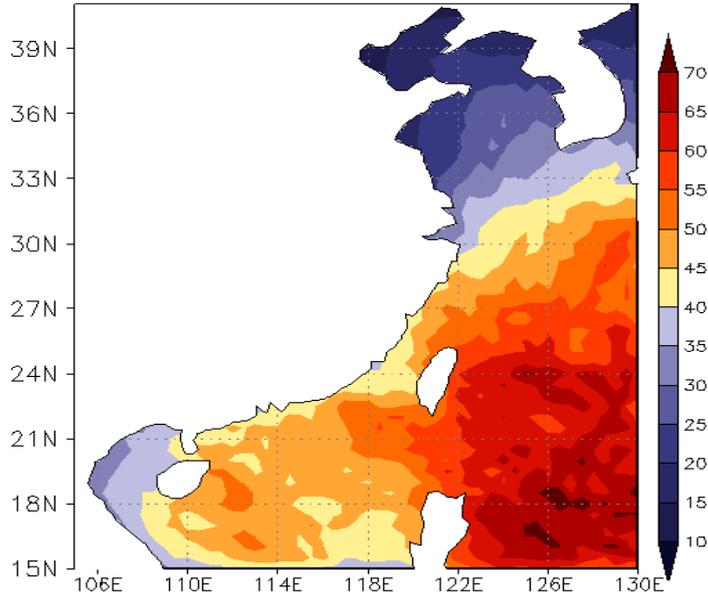
风速 (米/秒)	风力 (级)	名称	15° N - 45° N, 105° E - 130° E	进入警戒区	登陆
≥51	≥16	超强台风	88	34	5
41.5-50.9	14~15	强台风	70	58	27
32.7-41.4	12~13	台风	137	144	111
24.5-32.6	10~11	强热带风暴	125	110	119
17.2-24.4	8~9	热带风暴	58	44	53
10.8-17.1	6~7	热带低压	101	38	46

(4) 极值风速子系统界面





点击风速图查询按钮可查看如下图的风速图



中国近海 50 年一遇最大风速

5 成果 4: 研究复杂地形和平坦地形下台风强度变化特征

由图 2.6 可见, 福建中南部近海 50 年一遇最大风速相对于其两边海区偏小, 而由表 5.1 则发现, 48 年中登陆台湾的超强台风占 35%, 强台风占 22%, 较中国大陆任何一个区域都强, 其原因可能是热带气旋经过台湾岛的过程中强度减弱。本研究选择 2008 年第 8 号热带气旋“凤凰”(Fungwong) 为研究对象(图 5.1)。挑选“凤凰”作为研究对象主要基于以下几点考虑: 第一, “凤凰”为生成于西北太平洋的西(北)行热带气旋, 侵袭台湾的大多数热带气旋具有这样的特征, 具有代表性; 第二: “凤凰”经过台湾岛时的强度较强, 登陆台湾时为强台风(45m/s), 有利于进行对比分析; 第三: “凤凰”登陆台湾的地点位于台湾中部, 是中央山脉较高和地形较为复杂的地区, 有利于构造地形敏感试验与实况进行对比分析。利用 WRF 中尺度数值模式模拟台湾岛对台风强度的影响。进行复杂地形和平坦地形下台风强度变化模拟试验。

表 5.1 登陆台湾岛不同强度热带气旋的频数

超强台风	强台风	台风	强热带风暴	热带风暴	热带低压
31	19	16	12	8	2



图 5.1 台风“凤凰”路径图



5.1 WRF 中尺度数值模式简介

WRF(Weather Research Forecast)模式是由许多美国研究部门及大学的科学家共同参与进行开发研究的新一代中尺度预报模式和同化系统。它的研制是为了给理想化的动力学研究、全物理过程的天气预报、空气质量预报以及区域气候模拟提供一个公用的模式框架。

WRF 模式致力于改进从云尺度到天气尺度等不同尺度重要天气特征预报精度。重点考虑 1-10 公里的水平网格。模式结合先进的数值方法和资料同化技术,采用经过改进的物理过程方案,同时具有多重嵌套及易于定位于不同地理位置的能力。

WRF 模式为完全可压缩以及非静力模式,采用 F90 语言编写。水平方向采用 Arakawa C 网格点(图 5.2),垂直方向 WRF 提供了两种选择:一种为高度坐标(Eulerian height coordinate),即地面为 0 m,逐步上升到大气顶;另外一种为质量坐标(Eulerian mass coordinate),它是在 η 坐标的基础上建立的,即地面为 1,模式顶为 0(图 5.3)。时间积分方案使用 Runge-Kutta 三阶方案。模式不仅可以用于真实天气的个案模拟,也可以用其包含的模块组作为基本物理过程探讨的理论根据。

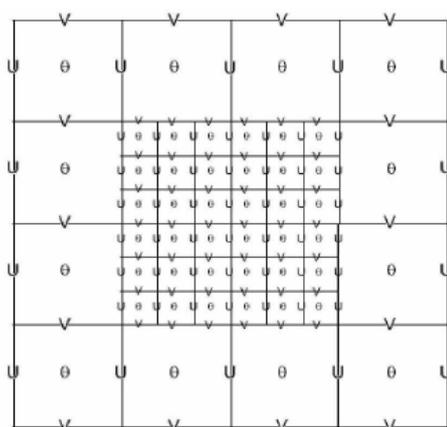


图 5.2: Arakawa C 网格示意图

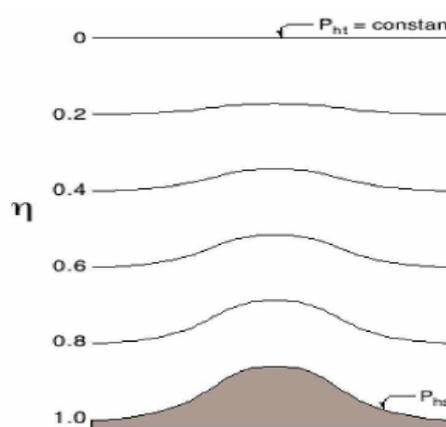


图 5.3: 坐标示意图



表 5.2: WRF 物理方案

微物理	Kessler 方案 (暖雨方案), Lin 等的方案 (水汽、雨、雪、云水、冰、冰雹), WSM3 类简单并方案, WSM5 类方案, Ferrier (new Eta) 微物理方案 (水汽、云水), WSM6 类冰雹方案, Thompson 等方案, 等等
积云对流	潜对流 Kain-Fritsch(new Eta) 方案, Betts-Miller-Janjic 方案, Grell-Devenyi 集合方案, 简化 Arakawa-Schubert 方案
长波辐射	RRTM 方案, GFDL (Eta) 方案
短波辐射	Dudhia 方案, Goddard 方案, GFDL (Eta) 方案
扰动	预报 TKE, Smagorinsky, 稳定扩散
边界层方案	MRF, MYJ, YSU
地面层	Monin-Obukhov 方案, MYJ 方案, NCEP 全球预报系统方案
陆面	5 层土壤模式, RUC 陆面模式, Noah 统一的陆面模式

5.2 WRF 主要模块及其功能

图5.4中WRF模式的系统流程图实际上可以简化为WPS + WRF-ARW Model + Post Processing三个部分。

WPS前处理由geogrid、ungrib和metgrid三部分组成, 其中: geogrid 用于建立“静态的”地面数据; ungrib 解压GRIB气象数据; metgrid 把气象数据水平插入模式领域内, metgrid的输出文件将被用作WRF模式本体的输入文件。

WRF-ARW Model主体由real.exe和wrf.exe两部分组成; real.exe形成积分所需要的初始场和边界条件; 而真正的积分则由wrf.exe完成。

在本研究中主要使用GRADS软件实现WRF模式的输出资料的可视化处理。

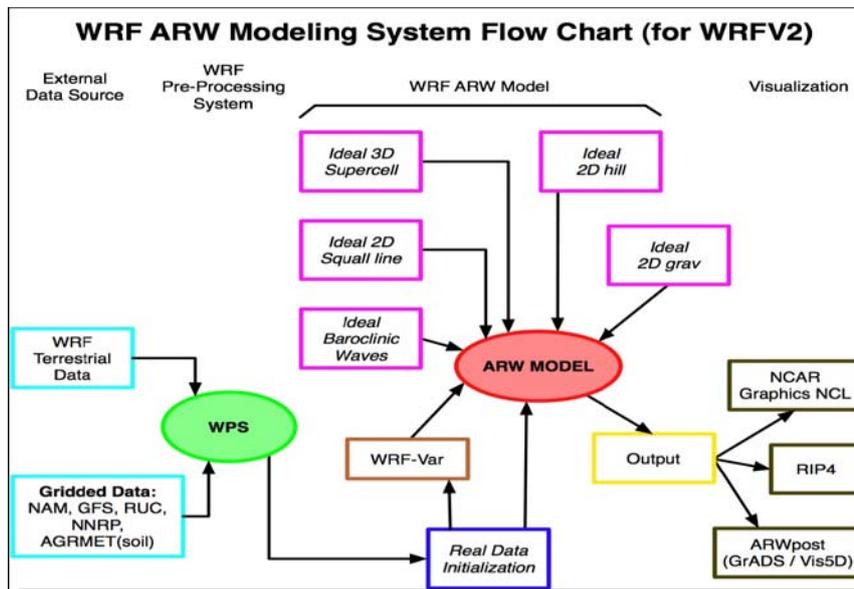


图 5.4 WRF 系统流程图

摘自 http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/tutorial/200807/WRF_Overview_Dudhia.pdf

5.3 控制试验参数设置

本章使用的是WRF ARW V2.2可压非静力数值模式，试验采用3重嵌套方案、固定网格的形式，三重区域的分辨率分别为72、24和8公里（见图5.5），中心经纬度为25N，120E；三重嵌套网格从外到内分别为domain1（55×40个格点）、domain2（100×79个格点）、domain3（181×148个格点）；全部试验积分开始时间为2008072512 U热带气旋，结束时间为2008073000U热带气旋，共积分108个小时，在积分过程中有不同分辨率网格间的信息交互。

在模式中地形、地表状况采用由NCAR提供的资料，三个domain地图分辨率分别为5m、2m和30s（即分别对应为55km，20km和1km）；粗域侧边界条件采用松弛边界条件，嵌套区域采用时变边界条件，下边界考虑了海平面温度、分层土壤温度，地图投影采用麦卡托（mercator）投影。

模式顶高100hPa，模式共分为28层，积分步长90S；主要物理过程参数设置：微物理过程为Lin等的方案（水汽、雨、雪、云水、冰、冰雹等）；长波辐射方案为RRTM方案；短波辐射方案为Dudhia方案；陆面过程采用热量扩散方案；



积云对流参数化方案采用的是浅对流Kain-Fritsch(new Eta)方案。

在控制试验MYJ方案的基础上，修改台湾岛地形高度（见表5.3）

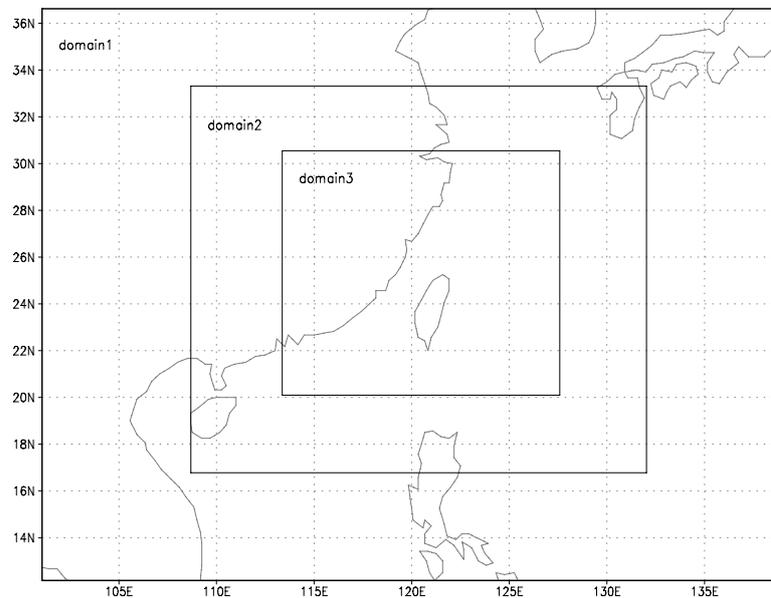


图5.5：WRFV2.2模式中的三重网格设置

表 5.3：地形敏感试验方案设计

方案	SEN100	SEN50	SEN00
台湾地形	原始高度	1/2原始高度	台湾陆地削平

5.4 模拟结果分析

图 5.6 和表 5.4 给出的是地形敏感试验与实况台风强度变化，从中可以发现将台湾地形减为 0、设置为原始地形高度的一半、原始地形高度时，气旋移动过程中受台湾地形影响所消耗的强度也从 64%、73%（以原始地形下强度为 100%），但是地形高度从 0m 到一半高度，气压变化差异不大，说明在有地形时，气压变化可能由于地形诱生低压等因素与台风系统相互影响而导致强度变化减缓。

由图 5.7 可以看出，当台风靠近台湾岛时，受地形影响，地面风场非对称性逐渐增加，风速明显减小；且台湾岛地形越高，气旋出现减弱的时间越早，风场非对称的程度也越高。从图中也可以看到风速较大的地方位于中央山脉两侧海



陆交界处，且风向平行于山脉。

表 5.4 地形敏感试验与实况“凤凰”经过台湾岛强度变化

时间	TRUE	SEN100	SEN50	SEN00
27_18:00	955	942	941	936
27_21:00	955	941	937	936
28_00:00	955	946	940	939
28_03:00	965	949	943	941
28_06:00	970	948	942	942
28_09:00	970	952	945	943
气压变化	15	11	8	7
减弱程度%	--	100%	73%	64%

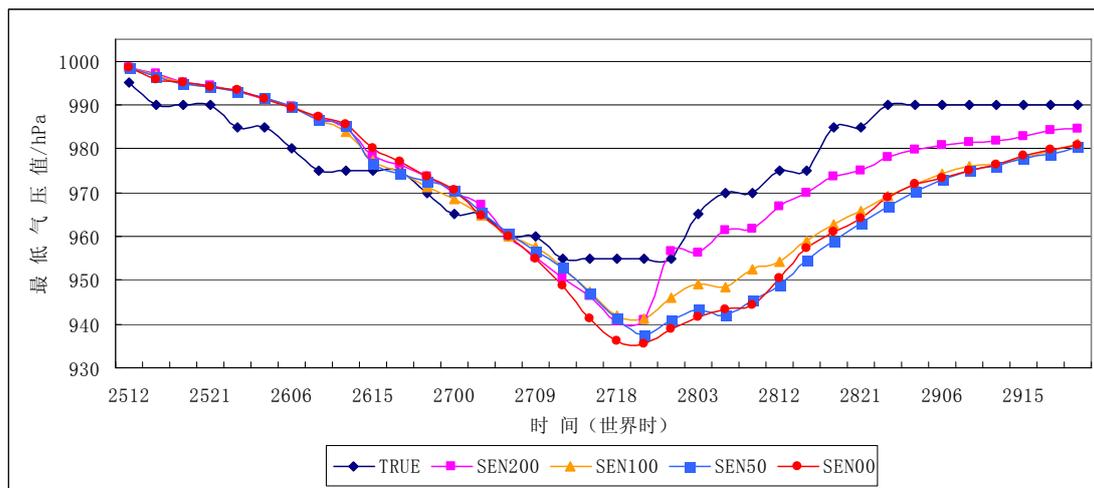


图 5.6 不同地形敏感性试验模拟台风强度及实况对比

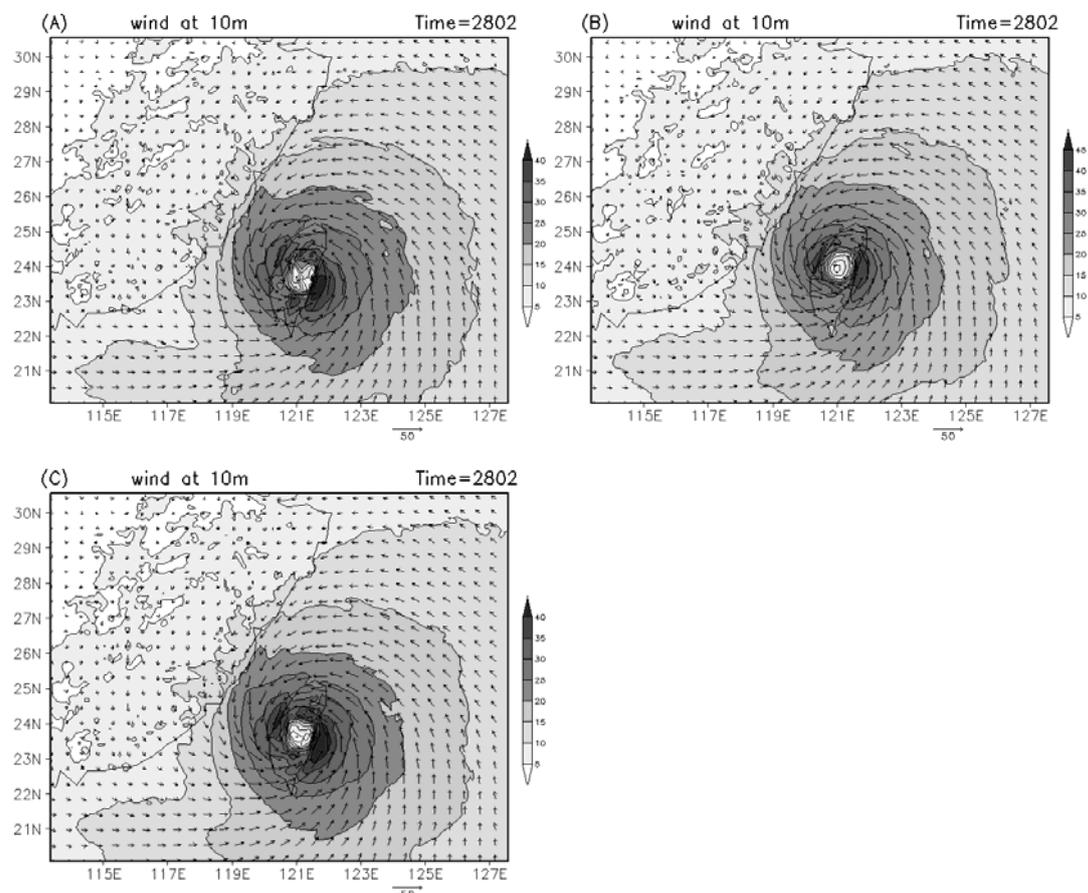


图 5.7 模拟第 62h 时登陆期间 10m 高度风场对比

(A: SEN100, B: SEN00, C: SEN50)

从图 5.8 可以看出，台风登陆期间，无地形时台风东西结构几乎对称，“眼区”上下一致，且“眼壁”竖直完整，说明系统仍然深厚，登陆后台风减弱程度较小；当有地形时，随着地形的增加，“眼区”逐渐变得不明显，上下一致性减弱，且“眼壁”也逐渐变得倾斜不明显，台风系统“填塞”程度也逐渐增大。从上图中也可以看出，“眼区”右侧南风风速明显大于左侧北风风速，且上下一致，但是，随着地形的增高右侧南风风速逐渐减小，当地形大于一定高度后，台风底层右侧南风风速开始小于左侧北风风速，但是中高层右侧南风风速大于左侧北风风速，上下不一致。最大风速始终出现在底层“眼区”两侧海陆交界处。

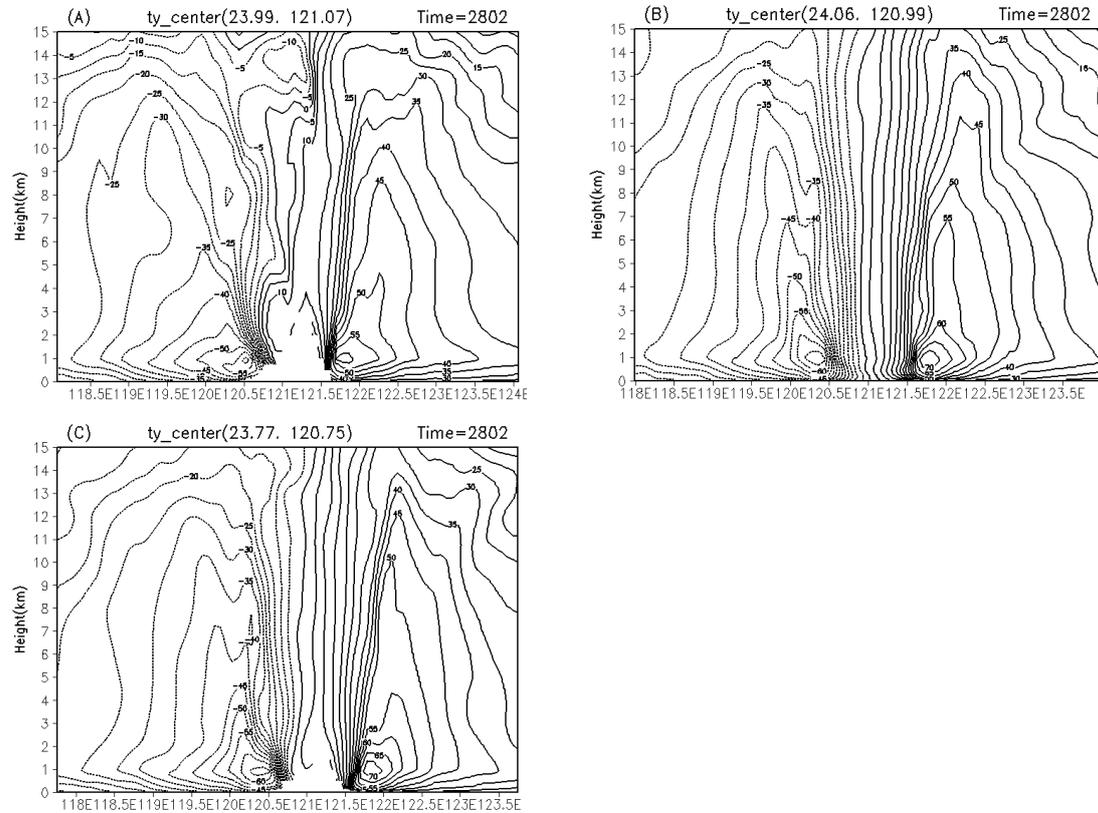


图 5.8 模拟第 62h 时登陆期间过台风中心径向风速垂直剖面
(A: SEN100, B: SEN00, C: SEN50)

通常台风环流低层相对涡度为正，高层为负。当高、低层相对涡度差小于零时，表明台风维持或发展；整体相对涡度差越小、结构越完整，台风强度也就越强，因而此物理量能较好的判断台风强度。图 5.9 给出的不同地形条件下的相对涡度差场，从图 5.9 中可以看出，相对涡度差小值区在“眼区”附近，地形越高，增大了台风结构的不对称性，不利于台风维持和发展，进一步说明了地形是影响台风维持或发展的一个重要因素。

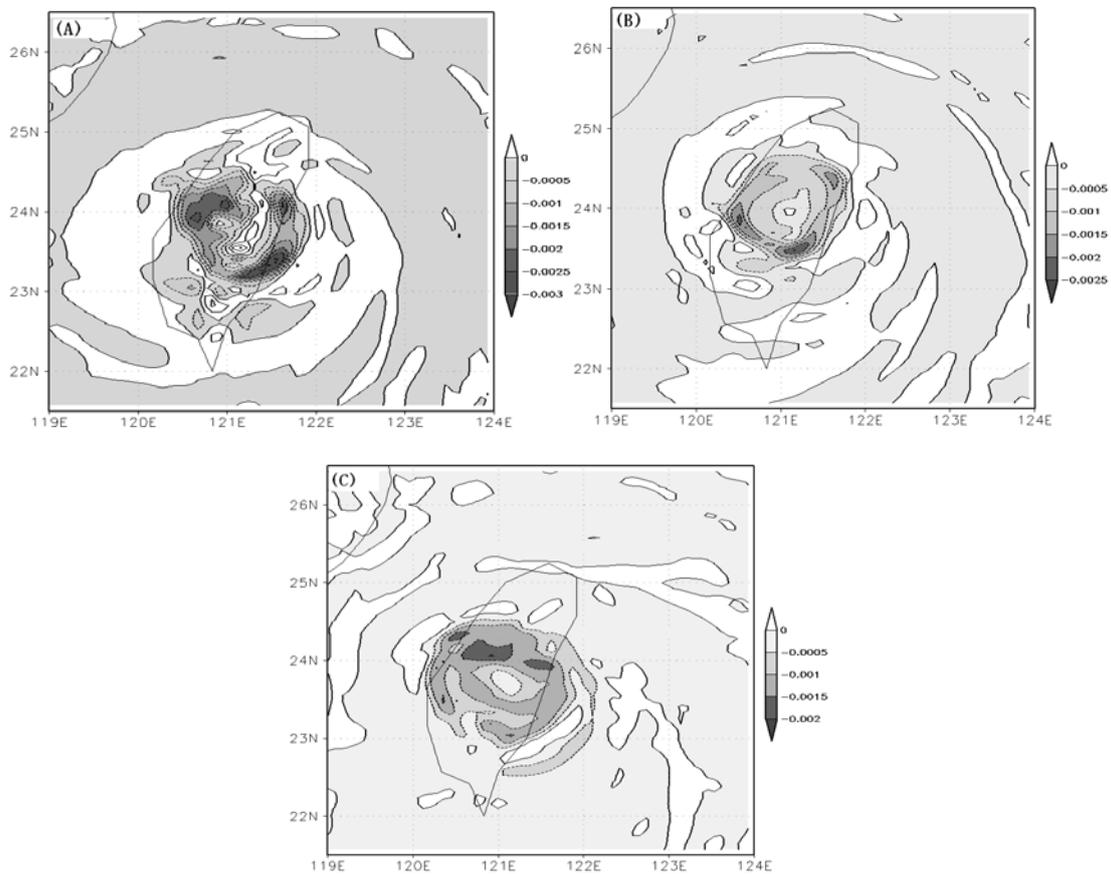


图 5.9 模拟第 62h 时登陆期间相对涡差 (阴影部分小于零)

(A: SEN100, B: SEN00, C: SEN50)

小结

- (1) 通过地形敏感性试验结果分析发现，台湾地形的存在使得台风强度减弱，且地形越高减弱程度越大
- (2)、在无地形情况下台风运动较快，有地形时台风在登陆前 3 个小时左右就开始减弱，且地形越高到登陆前台风减弱程度越大。
- (4)、通过对地形敏感性试验结果气压场、动力场和热力场的对比分析发现，地形的存在影响了台风赖以维持或发展的动力和热力来源，使台风动力和热力场结构变得非对称，并且地形越高非对称性越明显，“眼区”堵塞越快、越剧烈；“眼壁”结构也越不完整。



6 成果 5: 编写《台风对我国风电开发的影响与对策》一书

面对我国沿岸及近海风电开发的快速发展形势,风电工作者深感对热带气旋活动的气候规律认识不够,特别是对影响风电场的台风极端风速、风向突变、异常湍流等了解不够;对热带气旋造成的风电场破坏缺乏详实的科学分析;尚未形成一套成熟的应对台风灾害的科学策略。由项目组台风专家与风电专家合作,编写了《台风对我国风电开发的影响与对策》一书,目的是较为全面地揭示热带气旋活动的气候背景和以及与风电开发密切相关的工程设计参数,详细地介绍台风对风电开发的影响及台风作用下风电场受损机理,系统地阐述沿海风电场应对台风的技术对策和科学方法。它将指导风电场管理人员有效地利用台风风能资源,科学地应对台风、减轻台风灾害带来的损失。

本书汇集了作者依据长年代历史资料及最新观测所作的研究成果,内容丰富,结构严谨,图文并茂,通俗易懂,具有知识性、可读性;附录部分还给出热带气旋、台风、台风眼、飓风等名词解释、热带气旋发展阶段的典型卫星云图以及部分台风信息网站,方便风电场管理人员、操作人员使用参考。

全书分六章:

第一章 影响中国大陆沿岸和近海地区的热带气旋气候特征

第二章 热带气旋风场特性分析

第三章 热带气旋对风电开发的影响

第四章 沿海风电开发中台风应对策略

第五章 风力发电机组抗台风加强措施

第六章 风电场台风应急管理。

6.1 第一章 影响中国大陆和近海地区的热带气旋气候特征

作为全书的基础,依据 60 年(1949-2008)的热带气旋资料,统计、分析了影响中国大陆和近海热带气旋气候特征,分如下 5 节:

1. 西北太平洋热带气旋
2. 进入中国近海的热带气旋



3. 登陆中国大陆的热带气旋
4. 相应风电机组安全等级的各级风速出现频率分析
5. 热带气旋影响下 50 年一遇最大风速

6.1.1 西北太平洋、中国近海热带气旋基本特征

统计分析西北太平洋热带气旋、影响中国近海（15° N - 45° N，105° E - 130° E）和进入警戒区（离岸线3个纬距）的热带气旋以及登陆中国大陆的热带气旋频数（见表6.1）及长年代变化特征（图6.1，图6.2）。分析了西北太平洋和影响中国近海热带气旋不同年代的路径、强度特征（图6.3）。

表6.1 影响中国近海热带气旋频数计表

风速（米/秒）	风力（级）	名称	15° N - 45° N， 105° E - 130° E	进入警戒区	登陆
≥51	≥16	超强台风	88	34	5
41.5—50.9	14~15	强台风	70	58	27
32.7—41.4	12~13	台风	137	144	111
24.5—32.6	10~11	强热带风暴	125	110	119
17.2—24.4	8~9	热带风暴	58	44	53
10.8—17.1	6~7	热带低压	101	38	46

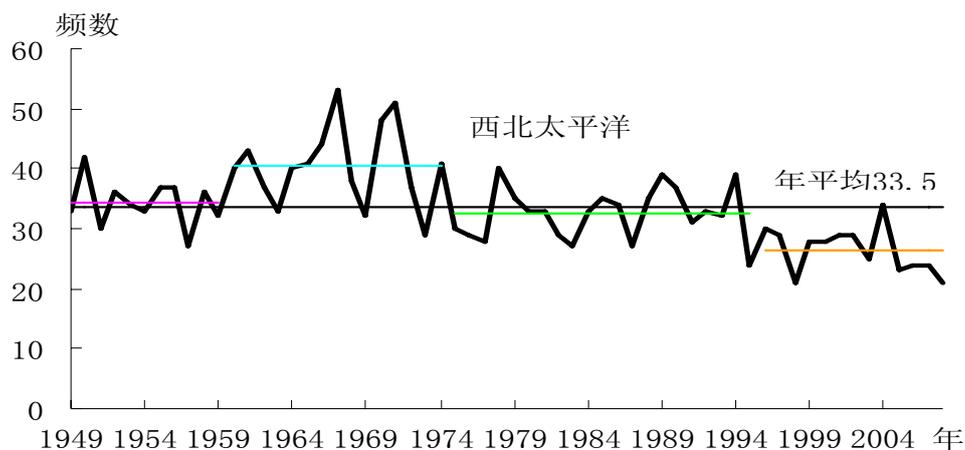


图6.1 西北太平洋年热带气旋频数的年际和年代际变化

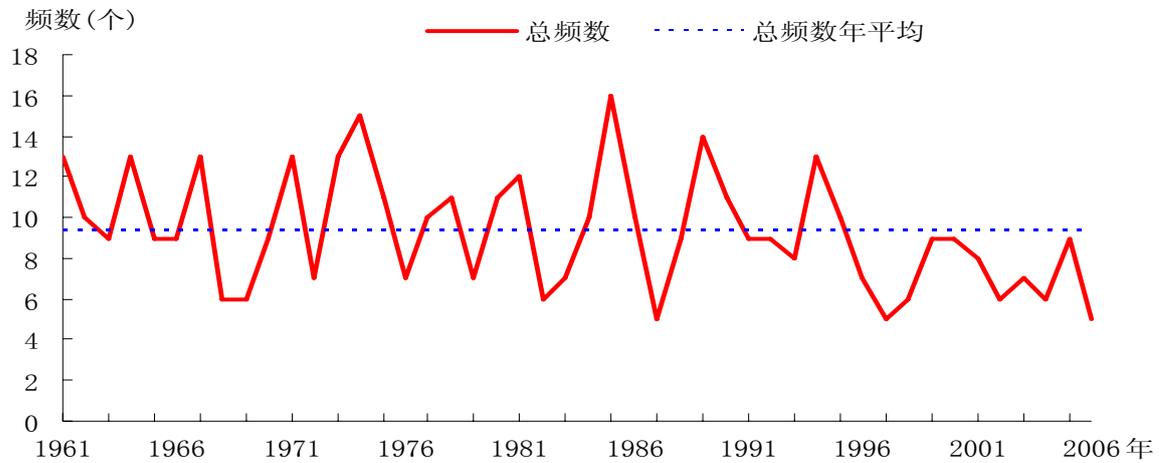
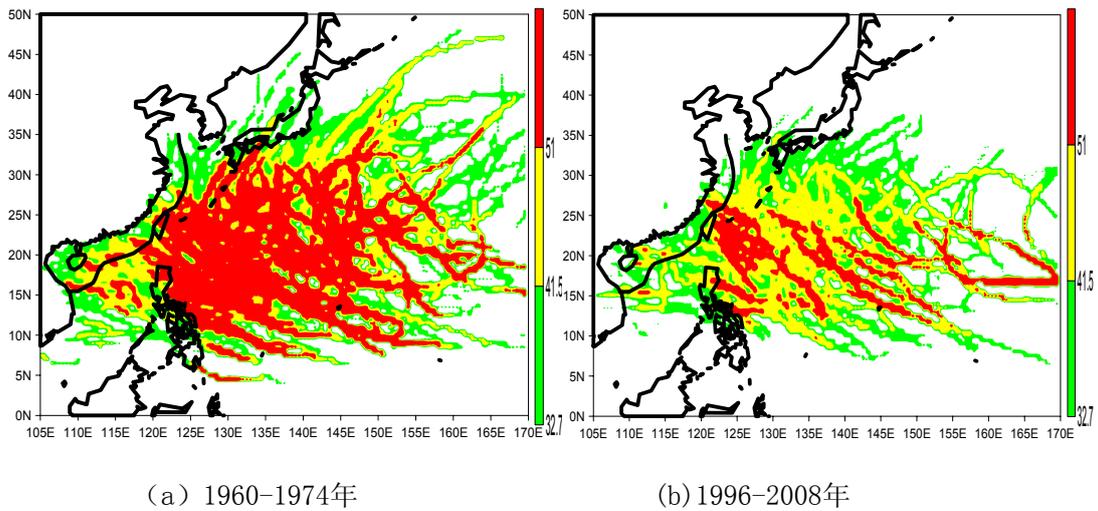


图6.2 进入警戒区热带气旋频数的年际和年代际变化



(a) 1960-1974年

(b) 1996-2008年

图6.3 影响中国近海不同年代热带气旋路径、强度特征

6.1.2 海上多年一遇最大风速

使用非对称台风风场模型，计算了1961-2008年进入 $15^{\circ}N - 45^{\circ}N$ ， $105^{\circ}E - 130^{\circ}E$ 的热带气旋大风风场，获得了每个热带气旋每2小时的 0.5° 经纬度网格点上的大风数据（见图6.4）；根据这些大风数据统计分析出与目前主流风机切出风速有关的风速（20m/s、22m/s或25m/s），与风电机组安全等级匹配的各级风速（32m/s、37.5m/s、42.5m/s、50m/s），7个风速级别的出现频率分析（见图6.5）；



在这些大风数据的基础上,形成了 0.5° 经纬度网格点上的热带气旋过程大风(每个热带气旋生命史中的最大风速)序列,利用目前国内外广泛使用的Poisson—Gumbel复合极值分布函数和Weibull概率分布函数,计算了热带气旋影响下中国近海50年一遇最大风速(见图6.6)。

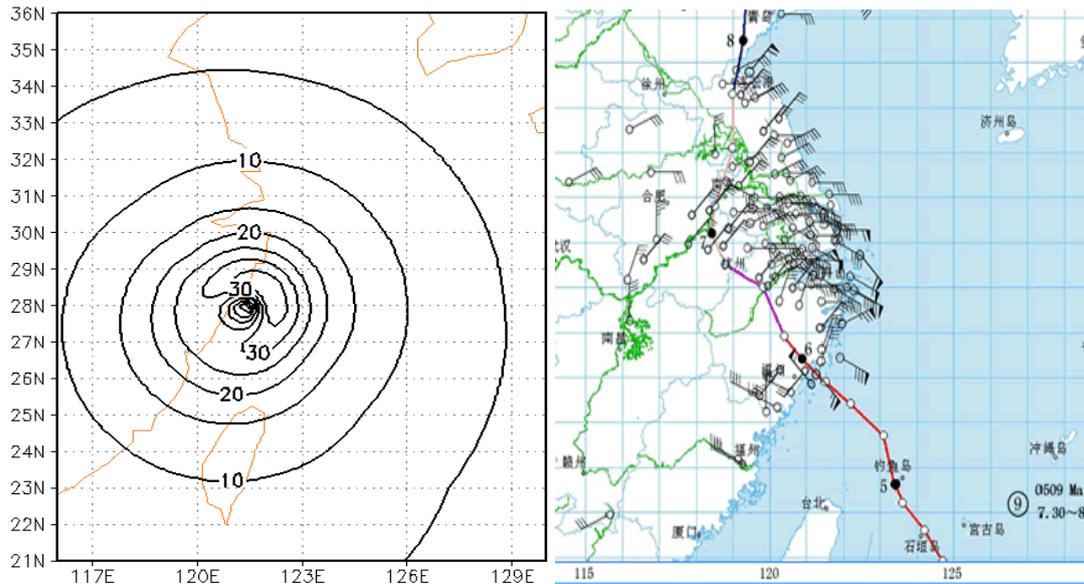


图6.4 非对称台风风场模型计算的台风‘麦莎’的风场和实况

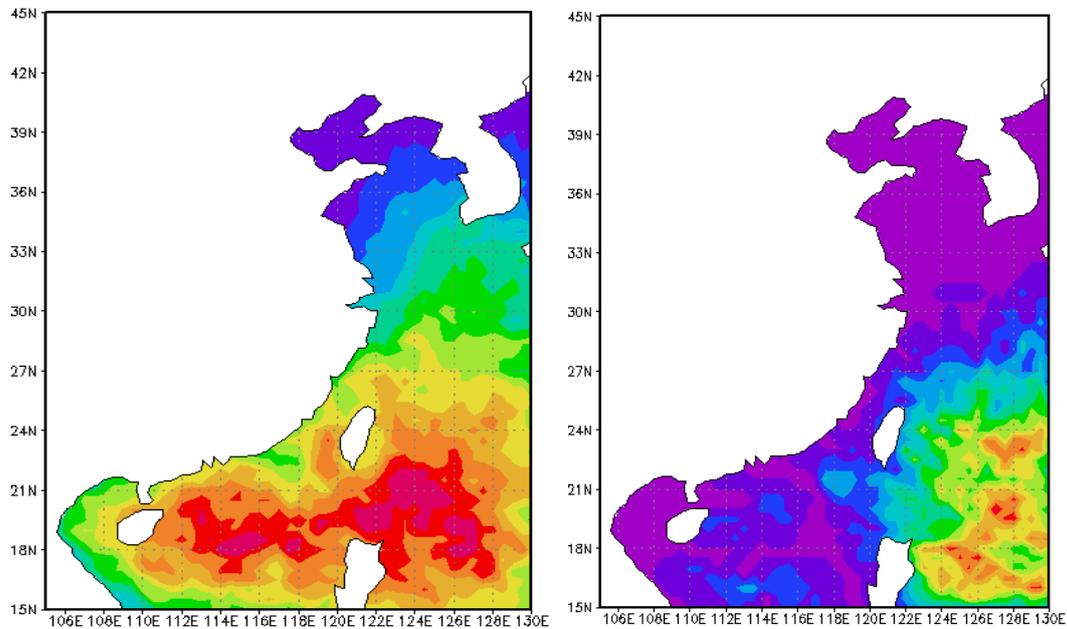


图6.5 15-25 m/s出现频率

$\geq 50\text{m/s}$ 出现频率

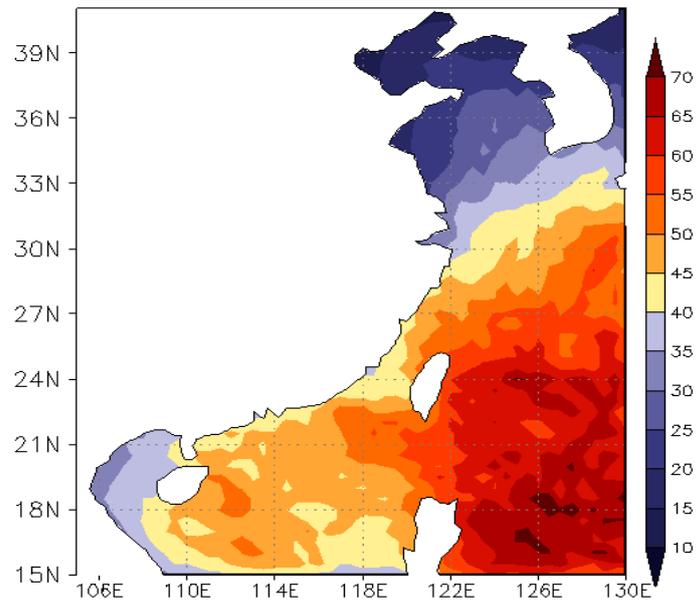


图6.6 台风影响下近海50年一遇最大风速

6.1.3 中国大陆沿岸多年一遇最大风速

根据上海台风研究所提供的气象站观测到的热带气旋大风资料，使用的Poisson-Gumbel复合极值分布函数和Weibull概率分布函数，计算了热带气旋影响下中国沿岸50年一遇最大风速（图6.7）。

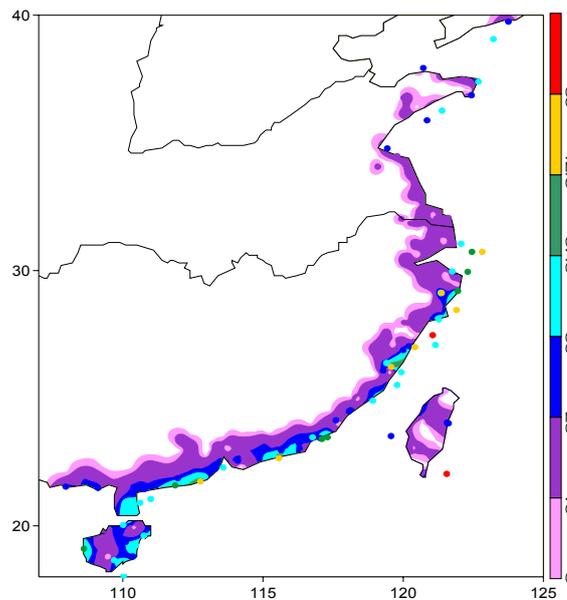


图6.7 热带气旋影响下气象站50年一遇最大风速

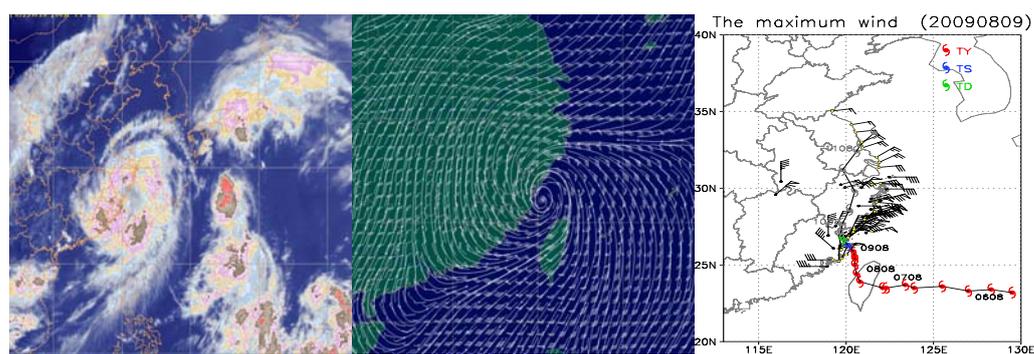


6.2 第二章 热带气旋风场特性分析

使用近年30多个铁塔观测资料,全面地阐述与风电开发密切相关的热带气旋风场特性参数,包括热带气旋地面和50米(或者70米)高度上的水平风场、近地面层热带气旋的湍流强度、近地面层热带气旋水平风向突变和垂直风切变。

6.2.1 典型台风个例分析

开始的3节分别给出近年登陆中国大陆的3个具有代表性的典型台风:2009年8号台风“莫拉克”,先登陆台湾经过台湾海峡再次登陆福建;2007年13号台风“韦帕”,直接登陆浙江、福建交界处;2009年7号热带风暴“天鹅”登陆海南岛;分析了三个热带气旋的大范围风场、卫星云图和地面(10米)水平风场分布特征(图6.8),50米高度沿海测风塔风的变化特征(图6.9),以及气压变化特征,目的使风电从业人员认识热带气旋的基本特征。风场特性。



(a) 卫星云图 (b) MM5 数值模拟 925 百帕风场 (c) 地面实测日最大风速

图6.8 “莫拉克”2009年8月8日云图(a)、MM5(b)和实况(c)风场图

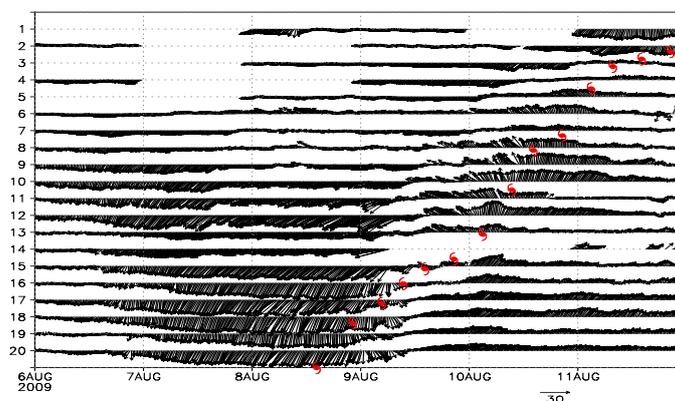


图6.9 “莫拉克”台风50米高风速随时间演变图(纵坐标为由南向北的测风塔编号,箭头长短表示风速大小,箭头方向为风向,红圈表示为台风登陆时间)



6.2.2 典型热带气旋的湍流强度和垂直风切变

详细分析了3个典型热带气旋的湍流强度、水平风向突变和垂直风切变一般规律。湍流是自然界中普遍存在而至今仍未被充分理解的自然现象。对于一个地区风力发电场址的选择，湍流强度是重要指标之一。湍流对风电机组性能和寿命有直接影响，当湍流强度大时，会减少输出功率，还可能引起极端荷载，最终造成风机损坏。登陆台风中心或中心影响的区域，风的湍流扰动对风力机系统会产生一种随机的强迫振动，如果湍流强度增大了2—3倍，则结构动态响应或脉动风荷载的计算值也会成倍增加，其中主风向湍流强度可增大2倍以上，强烈的湍流扰动可能是导致风力机断裂损坏的主要原因。过去由于资料限制，分析成果很少，本章对热带气旋影响期间不同地形、不同下垫面、不同风向、距台风中心不同距离的风速、风向、湍流强度风垂直切变最全面的分析,图6.10为位于“莫拉克”台风中心附近的霞浦东冲测风塔不同高度风速风向湍流强度变化,展现了在台风登陆前、登陆期间和登陆后风向风速和湍流强度变化特征,在风向不稳定的时段里,湍流强度突变现象异常明显,同时伴随风速的突降。而位于“莫拉克”北部较远的宁波慈溪测风塔风速较大,但风向和湍流强度变化不大(见图6.10)

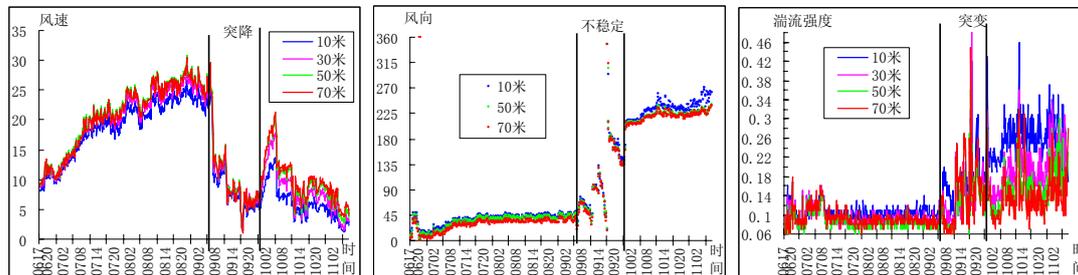


图6.10 位于“莫拉克”台风中心附近的霞浦东冲塔风速、风向、湍流强度变化

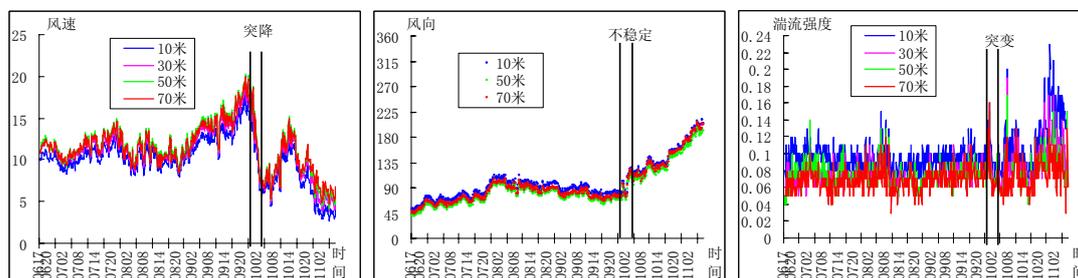


图6.11 位于“莫拉克”北部较远的宁波慈溪塔风速、风向、湍流强度变化

大气近地面层风的垂直分布特性，特别是热带气旋条件下大风的垂直分布特性，直接关系到风塔的风压、风振动、风荷载问题，也是抗风设计和风荷载规范制定、修订的重要依据。分析发现，在台风外围的地方风切变只与下垫面有关(图



6.12)；在台风登陆点附近，风速的垂直切变较为复杂，不仅与风速大小、下垫面有关，还与测风塔所处台风环流位置有关（图6.13）。

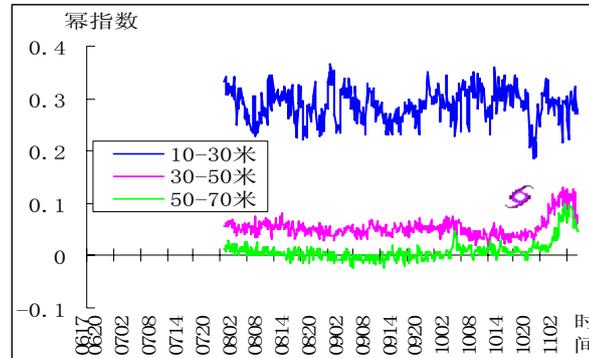


图6.12 台风外围启东东元测风塔幂指数变化

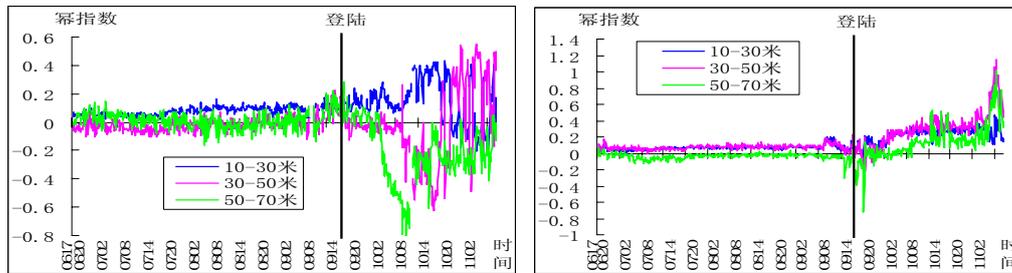


图 6.13 700 多米丘陵、海边沙滩幂指数

6.3 第三章 热带气旋对风电开发的影响

本章提出可利用型、需防御型和破坏型热带气旋的概念，对台风破坏风电设备的机理分析。主要包括 3 部分：

1. 热带气旋对风电开发影响分析
2. 台风对风电机组和其他方面的破坏
3. 台风作用下风电机受损机理分析。

6.3.1 热带气旋对风电开发影响分析

根据各风电场中安装的风电机抗风特性和影响该风电场的热带气旋强度，对于某一个特定的风电场，可以将影响它的热带气旋分为：可利用型、需防御型和破坏型三类。需要指出的是：同一个热带气旋，对于靠近台风中心的风电场而言



是破坏型的，远离台风中心的风电场是可利用型的。

(1) **可利用型热带气旋**。对于某一个风电场而言，如果直接登陆并穿过风电场的是热带风暴以下的热带气旋，或者是受到附近台风的外围环流影响，既风电场处在台风的10级风圈以外，这时风电场的风速基本在风机的运行范围之内，风机处于满发或接近满发状态，这样的热带气旋可以给风电场带来良好的发电效益，可称之为可利用型热带气旋。

(2) **需防御型热带气旋**。如果风电场处于台风或强台风的10级风圈范围内，风电场的风速都超出的运行范围，风机停机。虽然，最大风速可能仍小于风机的设计最大风速，但此时气流的湍流强度已超出设计标准，加之台风登陆过程中的风向剧烈变化，只有妥善应对才能避免风机损坏。对这类台风称之为需防御型热带气旋。

(3) **破坏型热带气旋**。当强台风或超强台风中心接近风电场时，风速超出了风电机设计抗风能力，风电设备就会受到较大影响和损坏。

2009“莫拉克”中心在福建省霞浦县沿海登陆，登陆时中心附近最大风力有12级（33米/秒）。“莫拉克”的狂风暴雨给台湾省造成巨大人员财产损失，是典型的破坏型热带气旋，对于浙江省南部和福建沿海的风电场，“莫拉克”则是一个需防御型热带气旋，风速超出两省沿海风电场风电机的切出风速，在台风登陆前后的两天中，福建省平潭某装机10万千瓦的风电场因风速过大，少发电量42万千瓦时。而对于浙江北部和江苏的风电场而言，“莫拉克”却是今年难得的可利用型热带气旋，这些地区的风电场从8月6日到8月11日，几乎天天满发，6天的发电量几乎是整个8月发电量的2/3。

6.3.2 台风对风电机组和其他方面的破坏

包括对叶片、轮毂中的变桨系统、机舱损坏、偏航系统、风机塔架和基础、其他设备的破坏。叶片通过轮毂与主轴相连，是风机将风能转化为机械能的主要部件，也是台风灾害中最常损坏的部件。根据叶片损害程度基本可以分为三类：叶片出现裂纹、裂纹发展，叶片翼型壳体破坏、叶片断裂。



叶片裂纹

(1) 图上风电机叶片出现裂纹 说明叶片主体受力结构未发生毁损性破坏，这与台风极大风速未达到设计值70m/s，风力产生的最大弯矩未超过叶片结构的极限弯矩有关。广东某风电场9只叶片被50.7m/s瞬时风速的台风所破坏，说明该型叶片在设计或者制造工艺上存在问题，未能适应在台风的复杂风况（风速与风向多变）和复杂地形引起的风切变所导致的复合载荷状况。由于台风通过时风向剧烈变化，风并不总是沿着对叶片受力较有利的顺桨方向吹入，也可能从对叶片受力最不利的垂直叶面方向吹入，此时风机可能由于电网停电等原因紧急停机而处于刹闸状态，这就大大增加了叶片的载荷。在湍流强度极大的气流中，叶片破坏可能因扭转刚度不够而产生扭曲振动，导致结构失稳破坏。

壳体破坏 当扭谐振进一步发展，或者叶片主梁与壳体胶粘接强度较差时，裂纹发展为裂缝，并导致扭谐振在蒙皮上产生的鼓包断裂，从而引发严重的二次破坏现象。



损坏的V42叶片

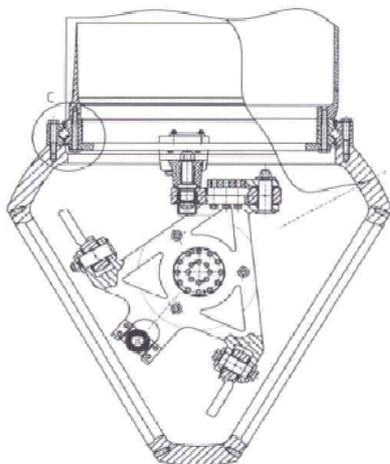


叶片断裂 在“鸣蝉”台风和“桑美”台风过程中，各有一台变桨变速风机叶片在根部被台风吹断。“桑美”台风通过鹤顶山风电场时，一台D4风机的3支叶片在根部断裂，主要原因可能是强风使轮毂中的变桨机构损坏，叶片角度变化后增加了叶片的迎风面积，导致3叶片在根部断裂。（见下图）



折断的D4叶片

(2) 轮毂中的变桨系统 当叶片在狂风吹拂下产生剧烈扭谐振时，变桨机构的受力大大超过了设计值，部分连接叶片和三角支架的拐臂断裂，或者三角支架本身破裂，叶片位置失去控制，不再处于顺桨位置，一些风轮旋转甚至出现飞车情况。在 2003 年的“鸣蝉”台风中也有变桨风机的变桨机构损坏。变桨风机在大风停机后，叶片都转到 90° 的顺桨位置，但在系统失电后，机械刹车往往动作，刹车片抱住高速轴上的刹车盘，阻止风轮自由转动。固定不转的风轮在大风中往往造成某一支叶片受力过大，在超出安全风速的狂风中结构屈服破坏。



损坏的三角拨叉与连杆



(3) **机舱损坏** 风机机舱外部的保护罩在台风过程中最易受损，但是，不同风机的不同设计，抗破坏能力完全不同。早年 600 千瓦以下的风电机采用顶部开启式和背掀式结构，在台风中极易于受损。尽管在“桑美”台风登陆前已对鹤顶山风电场的 11 台开启式风机机舱罩采取了加固措施，台风中除倒塔损毁外，所有开启式机舱盖全部被吹掉。



250和NTK41/500风电机

风电机的风轮通过轮毂与主轴相联接，主轴由主轴承座和固定在机舱底座上。在“桑美”台风中，狂风造成风电机机舱剧烈震动，使得 7 台 V42 风电机主轴的主轴承座发生位移，7 台 V42 发电机底脚松动位移，其中一台发电机的底脚断裂。3 台风电机齿轮箱和发电机之间的弹性联轴器损坏。同时，机舱内壁的吸音材料、发电机的冷却空气通风罩、顶部控制柜中的大量控制模块和齿轮箱的冷却系统等也大量受损。



V42发电机底角断裂和主轴承座移位

(4) **偏航系统** 在台风登陆时，电网停电且风向变动，机舱和风轮的侧向受风非常之大，只有使用偏航液压刹车的风电机的机舱基本保持停电时的位置，大多滑块型偏航系统或使用阻尼器加偏航轴承的机舱位置都被大风吹的转了方向，由于偏航驱动机构的减速系统大多有自锁机构，大风的强迫转向使不少风机的偏航系统在此过程中受到严重损坏。



偏航减速机构断齿和偏航齿圈断齿

台风登陆过程往往伴随着风向的剧变，同时，大风常常造成风电场线路故障，风机失电。对于变桨风电机而言，厂家分析风机在侧面受风比正面受风的载荷大 30%。

(5) **塔架和基础** 当台风作用在风机上的最大弯矩大于塔架和基础的设计值时，塔架和基础就会因此屈服破坏，并导致风机全损。风机塔架有桁架式和锥筒式，目前绝大部分风电机都使用锥筒式塔架，无论那种塔架，在风速过大时都会发生倒塔情况。



风机塔架折断



机组基础破坏后风电机整体倾倒

(6) **其他设备** “桑美”台风袭击中未倒的23台风电机的所有风速风向仪全部被吹掉，个别风电机的避雷针被吹歪。14台V42的铝合金天窗被吹坏，剧烈的机舱振动将顶部控制柜中的许多电气元件和控制模块震出插座而受损。



(7) **输电线路** 在强台风正面袭击过程中，接入系统和场内线路常发生故障跳闸，同时出现大量断杆、倒杆、断线等，造成输电系统很大损失。“桑美”台风中，鹤顶山风电场7公里的35千伏联网线路中17基钢塔倒了10基，场内10千伏线路17基杆塔倒塔，断线、拉方和横担损坏不计其数。钢塔线路倒塔主要原因是：

1) 我国沿海地区的线路设计一般按浙I气象区35米/秒、浙II气象区30米/秒风速考虑，登陆的台风风速超过了设计的范围，超过了线路的实际抗风能力。

2) 山区风电场的线路塔位通常位于迎风山岭和风口上，整基铁塔和导线所受的风压荷载过大，造成杆塔折断倾翻。有些倒塔线路运行年限比较长，铁塔留有裕度较小，缺少良好维护。



3) 事故铁塔两侧的档距常为大小档, 即一侧大档距, 另一侧小档距, 在特大台风的情况下, 铁塔顺线路方向两侧承受悬殊的横向水平力, 发生扭转倾倒, 是造成铁塔倾倒主要原因。

4) 部分装配式基础的横条与压条比较薄弱, 抗倾覆能力不能满足特大风力时, 塔身横向合力和导地线合力对铁塔根部的合弯矩作用, 出现不同程度的上拔, 是造成铁塔倾倒重要原因。风力过大, 拉线挂耳撕裂, 塔拉盘拔出, 导致塔扭转倒塌。

断导地线和引流线的的原因:

1) 干型铁塔的中相导线的引流线压接型耐张线夹出口10厘米处导线铝股全断, 跳线串绝缘子和引流线无数次大幅度摇晃弯曲导线以致铝股疲劳折断, 说明该塔型的结构有待完善。

2) 在大风情况下, 耐张引流线晃动幅度很大, 与塔身的电气距离不够。暴露出该类型铁塔在外角侧耐张引流防风偏方面存在缺陷。

3) 大风刮起异物割伤导地线或风载过大导致导地线断股或断线。

(8) 台风登陆的同时往往带来大量雨水, 造成一些次生灾害, 1) 洪水, 大风和暴雨引起的山洪将道路桥梁冲断, 给风电场造成严重影响, 2) 地质灾害, 3) 风暴潮, 当台风登陆与天文潮汛接近时, 会造成台风风暴潮、洪水、天文大潮三碰头。

6.3.3 台风作用下风电机受损机理分析

(1) 叶片损坏原因分析 ; 1) 风速过大, 湍流强度高。2) 叶片结构设计、制造上的原因。

(2) 风电机不同控制策略(失速、变桨)一结构强度不同;

(3) 风电机的控制策略: 主动偏航、停电刹车。台风登陆时的风向突变, 风向可能从对叶片受力最不利的垂直叶面方向吹入, 此时风机可能由于电网停电等原因紧急停机而处于刹闸状态, 这就大大增加了叶片和整机的载荷(增加30%)。



(4) 风机塔架倒塌原因分析: 1) 风速过大导致作用在风电机上的风压超过设计最大值(风电机基础和塔架); 2) 风电机整体设计中的强度布置(基础>塔架>机舱>叶片)

电网停电与风机损坏的关系: 电网停电后, 风电机偏航系统不能及时随台风的风向改变而偏航。机械刹车对风轮的固定增加了叶片的受力。

6.4 第四章 沿海风电开发中台风应对策略

针对一到三章的分析结果, 提出一些与沿海风电场建设有关的应对热带气旋的技术对策。主要包括: 风电机组的选型、输变电设备的选型、新技术的应用、对已建成风电场落后设备的改进。

6.4.1 热带气旋影响地区风电机组及附属设备选型

(1) 风电机组选型分析 现有的风电场输变电设备及线路基本不能满足热带气旋影响期间不间断提供风电机组电源, 导致设备的损坏。

台风是反时针旋转, 一般开始为东北风, 登陆后迅速转为西南风, 如果风机在东北大风时顺桨并断电不能继续跟踪风向时, 等到风向转为西南风向时风电机组与风向的夹角为 0~180 度之间, 由负压变正压, 叶片容易损坏, 所以沿海及海上风能开发利用不但要考虑风速, 还要考虑风向。

在中国东南沿海, 现有标准型风电机组能满足一部分场址的气象条件, 在浙南-闽北一带、粤东强台风出现频率较高的海域则需要重新设计可适应当地气象条件的 S 级风电机组。在没有专门为这一地区设计生产的机组出来之前, 场址选择必须慎重。

在保证输变电设备供电正常的情况下, 许多地区可以利用现有标准机型, 可以降低大部分投资, 并保证设备安全高效运行。

综合考虑定桨距与变桨距风电机组的各方面参数及经济性, 建议上述地区的风电场选用目前已经技术成熟且性能优良、风能利用效率高、利于日后进行技术改造且更利于在强热带气旋条件下生存的变速恒频变桨距风电机组。



6.4.2 热带气旋影响地区风电技术的改进

复杂地形情况下风向变化频繁，风速不稳，使风力发电机组高度范围内风垂直切变大、湍流强度高，对目前技术条件下的风电机组带来严重挑战。在沿海或近海地区，由于盐雾腐蚀严重、湿度大对风电机组及供电稳定性影响，特别是在强台风影响期间，所有这些不利因素可能同时出现，并发生叠加效应，对风电机组使用寿命乃至生存环境都带来严重的挑战。

现有最高标准型风电机组的设计风速是按照 50 年一遇瞬时风速 70 米/秒及 10 分钟最大风速 50 米/秒设计的，而且是按照电网供电正常的条件设计。由于台风影响期间电网对风电机组的供电不能保证，加之沿海地形复杂条件，容易出现异常湍流和很大的风切变，给风电机组形成致命的打击。

台风对风电机组的破坏主要是由于风电机组的供电中断，风电机组处于偏航系统与叶轮刹车制动的紧急停机状态。供电中断使变桨矩风机机舱不能按要求迎风、定桨矩风机机舱不能侧风，以及叶轮不能处于自由状态，这种状态的持续将导致叶轮、机舱以及塔筒之间的弱者损毁，特别是当其中的塔筒先于叶片不能承受台风施加的载荷时，将出现整个风电机组损毁的恶劣情况。为了提高风电机组在台风期间抵抗外部恶劣环境的能力，经过对近年被损坏设备的损坏原因分析总结，在此提出一些技术改进建议：

(1) 测风设备 风速风向如同风电机组自动控制系统的指挥棒，因此机组测风设备性能优良、牢固可靠是提高风能利用率和机组安全运行的保证。

(2) 刹车系统 风机叶轮部分的制动是以叶片空气动力制动为主，机械制动为辅，与叶轮锁定系统相结合的综合制动系统；齿轮箱高速轴长期保持制动将导致齿轮箱、叶片和偏航系统受到损坏；在不影响机组原有安全链和故障表现形式的前提下，叶片完全顺桨的同时使叶轮处于自由状态。台风活动期间风大雨雨急，电网最容易发生故障，风电机组供电中断，失电使部分保护失去作用，失电后不能偏航的情况下，齿轮箱高速轴长期保持制动将导致齿轮箱、叶片和偏航系统因无法消除大风施加的巨大能量而受到损坏。

(3) 叶片结构及强度 充分考虑极端载荷，设计专用翼型及提高标准等级；研究利用新的叶片结构、材料及纤维层铺方式，确保叶片强度、柔韧性和防止产生共振，解决玻璃钢材料的剪切强度差的问题；保证叶片的气动性能和造价的同



时兼顾粘接面积与粘接强度，调整空腔率。

(4) 塔架及偏航机构考虑共振频率，极端载荷，加强塔架强度、柔性，有效的减振措施，改进制造工艺，避免应力集中，有效提高塔筒的设计寿命和抗高风速能力。

(5) 风电机组的控制 风电机组应加强对叶片、齿轮箱、塔架、机舱的振动监测，有效降低设备的疲劳载荷，综合提高设备的设计使用寿命。加强对叶片、齿轮箱、塔架、机舱的振动监测；能够自动调整转速、功率输出、对湍流强度高的方位与风速进行扇区管理等功能；分清设备故障的严重程度，分析后果，逐级降低运行状态，减少对设备的冲击，有效延长设备寿命；

(6) 输配电设备、线路及供电保障 自备给风电机组供电控制、偏航及动力系统提供场内紧急备用电源，确保对风力发电机组不间断供电。为了有效利用投资，可以对全场风电机组的偏航与液压驱动电源进行分组分机控制，以便减少备用电源的容量。

(7) 风电机组及输变电设备的远程监控 对每台设备的运行状态进行实时监控；分类分析与总结；及时跟踪，异常情况及时处理；作为现有设备和以后的风场建设资料依据。

(8) 要在订货协议、交货验收、铁塔组装等诸多环节中层层把关。订货协议中明确负偏差限度，交货验收时抽查率不低于5% ，铁塔组装施工时再进行复查，做好抽查、复查记录。

6.5 第五章 风力发电机组抗台风加强措施

变桨距风电机组在遭遇台风袭击时，由于受频繁变化的风向和湍流的影响，不论叶片在工作位置还是顺桨位置，叶片都会受到更大的交变载荷，变桨系统是该项载荷的承受环节，变桨系统出现故障将造成叶片或机组毁灭性的损坏。经历过台风袭击的风电场的统计数据也说明，变桨系统是风电机组抵抗台风袭击的主要薄弱环节。因此，在有台风袭击的风电场建议选用定桨距风电机组，以避免变桨系统损坏造成重大经济损失。本章仅对定桨距风电机组抵抗台风袭击的加强措施进行叙述。加强方案分为二部分，第一部分是主要部件承载能力的加强，第二部分是主动保护措施，即进入台风状态时，使风电机组处于最佳抗台风姿态。



6.5.1 部件承载能力的加强

依据某风电场近几年的台风资料，并考虑技术及经济的可行性，确定基础和塔架按瞬时风速 80 m/s，叶片按瞬时风速 75 m/s 对风电机组进行加强。

(1) 基础和塔架的加强

基础和塔架加强设计后，1a 类风况时；设计余度系数达到 1.485。

瞬时风速 75 m/s 时；设计余度系数为 1.41。

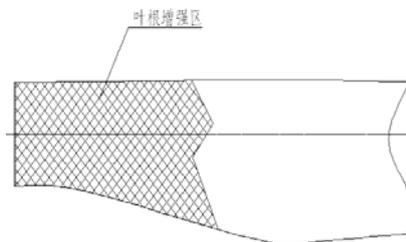
瞬时风速 80 m/s 时；设计余度系数为 1.31。

(2) 叶片的加强

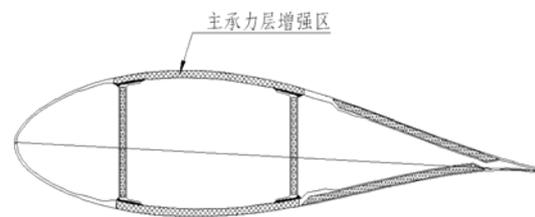
按瞬时风速 75 m/s 加强设计，用超强玻璃纤维布替换普通玻璃布，并对叶片的主要承力区进行局部加强，使叶片的疲劳载荷和极限载荷比原 1a 类叶片都有 15% 的加强。

● 主要加强部位

▲ 叶根区域

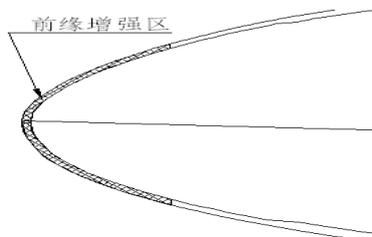


▲ 主体区域主承力层

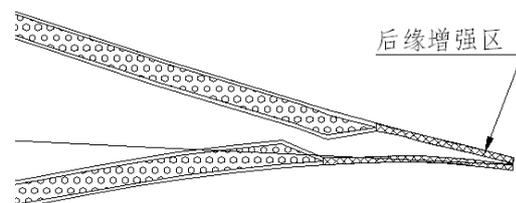


● 适当加强部位

▲ 叶片前缘区域



▲ 叶片后缘区域



(3) 主轴制动力矩的加强

主轴制动力矩按瞬时风速 75 m/s 加强设计，并调整液压系统节流阀，使主



轴制动时间控制在最佳范围内。

(4) 偏航制动力矩的加强

按瞬时风速 75 m/s 重新选择偏航制动器，或者不改变制动器型号，增加制动器数量。

(5) 偏航轴承的加强

在台风袭击时偏航轴承以及偏航轴承与机舱、塔架的联接螺栓都将承受更大的交变载荷，按瞬时风速 75 m/s 重新核算偏航轴承及联接螺栓的强度，设计抵御风速 75 m/s 的 HD1000S 型风电机组专用偏航轴承以及加大的联接螺栓。

机舱罩、整流罩及其联接部件加强的成本比较低，可以按瞬时风速 80 m/s 或再高一点的风速加强。当然，也要同时对玻璃钢制件的联接部分和联接零件进行加强。

6.5.2 主动保护措施

控制系统增加‘台风状态’模式，该模式执行：

- 主轴机械制动刹车状态；
- 叶轮偏航 90 度侧风并锁住；
- ◆ 叶尖制动体甩出。

与风速大于 25 m/s 时的风电机组‘大风保护’模式不同的是，‘大风保护’模式叶轮跟踪主风向偏航 90 度侧风。‘台风状态’模式是叶轮与台风主风向偏航 90 度后，不再跟踪变化不稳定的台风风向，叶轮在台风期间固定不动。

(1) 主轴机械制动

主轴机械制动有二个状态可以选择，制动器松开或刹车。主轴制动器松开叶轮空转可以有效的保护齿轮箱，但是叶轮失去负载空转，在台风状态下肯定要失速飞车，造成叶片和风电机组的损坏。失速飞车时的准确时间无法计算，但随着风向的变化和风速的增加，叶轮旋转加速度会发生突变，失速飞车只是时间问题。

主轴制动器刹车状态会使齿轮箱内的传动齿轮承受不断变化的扭矩作用，可能造成传动齿轮断齿。GB/T 19073 规定齿轮齿形弯曲静强度安全系数不小于



1.4, 齿形弯曲疲劳强度安全系数不小于 1.7。DIN 3990 规定按 3 倍额定功率计算静载, 齿形弯曲强度不小于 1.4。AGMA 6006 规定按使用系数 1.3 计算, 齿形弯曲强度不小于 1.56。目前齿轮箱制造公司设计的齿轮箱都要同时满足上述三个标准的要求, 应该说齿形有足够的抗断齿能力。

所以选择主轴制动器刹车状态比制动器松开状态能更有效的对风电机组进行保护。

定桨距风电机组选择的是常闭型制动器, 即是在失电状态下靠弹簧力使主轴制动, 该工作原理最适合台风状态下的机组保护程序。而变桨距风电机组的制动器是常开型的, 失电状态下制动器将打开, 在某一风向状况下叶轮可能飞车, 使风电机组遭受重大损坏。这也是变桨距风电机组抗台风性能弱于定桨距风电机组的原因之一。

(2) 叶轮偏航 90 度

叶轮偏航 90 度后有二个选择, 叶轮跟踪主风向偏航和叶轮偏航后不再跟踪主风向, 叶轮固定不动。

台风经过时风速变化大、风向变化频繁, 如果让叶轮跟踪频繁变化的风向, 由于偏航动作的滞后性, 不仅无法保证叶轮偏航主风向 90 度, 而且在高风速和风向频繁变化状况下偏航, 对偏航驱动系统和叶片都是更加严峻的考验, 可能发生偏航驱动主动小齿轮轴折断或叶片损坏的重大事故。

如果让叶轮与台风主风向偏航 90 度后锁住不动, 将没有载荷作用在偏航驱动系统的主动小齿轮上, 也就不会发生在台风袭击时小齿轮轴折断事故, 以及进而引发的风电机组更大事故。

在台风状况下选择叶轮偏航锁住不动, 有利于风电机组的保护。

(3) 叶尖制动体甩出

台风状况下风向变化不定, 叶轮偏航台风主风向 90 度并锁住状态时, 在台风经过的整个周期, 叶尖制动体甩出将减小叶轮旋转力矩的最大峰值, 减小叶片及齿轮箱传动齿轮的载荷, 有利于风电机组的保护。

台风状况下叶尖制动体甩出, 联接叶尖的碳纤维轴将承受较大的载荷, 应核算碳纤维轴的安全性。



6.5.3 ‘台风状态’模式控制程序说明

(1) 自动进入‘台风状态’模式

a. 控制系统设置‘台风状态’代码，此状态程序具有最高优先权。激活条件为：15 秒平均风速大于设定值（最小 25 m/s，最大 50 m/s，默认 32 m/s）。

执行程序为：

- 叶轮偏离台风主风向 90 度锁住，对台风不作实时跟踪；
- 主轴制动启动（刹车盘锁住）；
- ▲ 叶尖制动启动（叶尖甩出）。

瞬时风速 ≥ 25 m/s 时风电机组进入大风保护程序，当风速达到‘台风状态’条件风速时，自动转入‘台风状态’模式。

b. 依据台风过后风电机组状况采用手动重启，可由授权 80% 以上级别的操作员通过 SCADA 或 WKA 手动复位，退出‘台风状态’模式。

c. 如果风电机组在进入‘台风状态’模式前失电，风电机组将进入‘脱网保护’模式。与‘台风状态’模式的区别是叶轮不一定处于偏离台风主风向 90 度。

(2) 手动进入‘台风状态’模式

如果风电场配置集中备用电源，控制系统在自动进入‘台风状态’模式基础上，增加‘备用电源’参数，此参数由操作员通过 SCADA 或 WKA 逐台手动设置。进入‘备用电源’状态，自动激活风速 ≥ 25 m/s 大风保护程序，当风速达到‘台风状态’条件风速时，自动转入‘台风状态’模式重启程序与自动进入‘台风状态’模式相同。

6.6 第六章 风电场台风应急管理

在前面4章的基础上，本章针对台风影响风电场受灾特点，提出防御台风的应急管理思路和措施，供各地风电场编制防台应急预案时参考。按照防御台风应急管理的四个阶段，本章阐述下面四个方面内容：

- 1) . 制定科学的防台预案；



- 2) . 热带气旋到来之前的预警;
- 3) . 热带气旋邻近时应急措施;
- 4) . 灾后评估和恢复生产。

6.6.1 制定科学的防台预案

坚持“以人为本”、“减轻灾害风险及危害”的科学发展观，遵循“预防为主、预防与应急相结合、常备不懈”的方针，贯彻统一指挥，分级响应，属地为主，协同作战的原则，防台预案要做到科学性和可操作性。

6.6.2 热带气旋到来之前的预警

根据气象部门对台风的预警情况，台风预警信号分四级，分别以蓝色、黄色、橙色和红色表示。

(1) 台风蓝色预警信号标准：24 小时内可能或者已经受热带气旋影响，沿海或者陆地平均风力达 6 级以上，或者阵风 8 级以上并可能持续。

(2) 台风黄色预警信号标准：24 小时内可能或者已经受热带气旋影响，沿海或者陆地平均风力达 8 级以上，或者阵风 10 级以上并可能持续。

(3) 台风橙色预警信号标准：12 小时内可能或者已经受热带气旋影响，沿海或者陆地平均风力达 10 级以上，或者阵风 12 级以上并可能持续。

(4) 台风红色预警信号标准：6 小时内可能或者已经受热带气旋影响，沿海或者陆地平均风力达 12 级以上，或者阵风达 14 级以上并可能持续。

风电场为了能够防止由于台风造成重特大事故及对社会有严重影响的其他事故，减少事故损失的程度和范围，确保电厂安全运行，保证公司经济安全、稳定和职工生命财产安全，在参照了气象部门的台风预警规定，根据风机运行特点，对台风险情状态做了与风电场抗台相适应的规定。

6.6.3 热带气旋临近时应急措施

风电公司在制定台风应急措施的时候，应按照“依靠群众，依靠集体，生产自救，互助互济”的救灾工作方针，实施应急及救灾工作。

为了能高效的完成台风应急及救灾工作，风电公司应定期组织防台应急预案



演练。具体要求为：

- (1) 风电场一年内各预案的实战演练一般至少组织一次。
- (2) 每一次实战演习结束后，都要组织对整个演习的实际效果进行全面、正确的评价，及时进行总结讲评，组织力量对预案进行修编完善，确保预案的科学性、实用性和可操作性。

6.6.4 台风应急的准备工作

一般情况下，台风对风电场的设施破坏主要表现在道路、输电线路和风电机的损坏方面。风电机的损坏又分为机械和电气部分，风电机机舱舱盖、偏航系统、变桨机构和风速风向仪最易受超大风力和多变风向的破坏。故应做好以下台风应急的准备工作：

- (1) 购买生活食品及相应防台抗洪物资，保证生产现场所需。
- (2) 当班正值应重点检查中控楼有关办公设备及物品是否充足完好。
- (3) 当班副值应对中控楼各室各门窗及重点部位照明情况进行检查。
- (4) 当班班长应检查生活水系统是否完好，生活用水池水量是否充足，保证防汛抗台期间的正常用水。
- (5) 当班驾驶员应全面检查车辆情况。
- (6) 组织人员对风电场中控楼变电设备、风电机及箱式变以及各风场场地、道路、公路排水沟等进行台风洪水来临前的巡视巡查工作
- (7) 针对历年来风电场出现过在台风时期部分风电机设备机舱罩、盖受损的情况，风电场需不断总结经验，吸取教训，防止类似事故的再次发生。
- (8) 在台风来临前应对消防水泵进行一次试验检查，确保生产场所或设备基础浸水后能及时进行抽水工作。
- (9) 风电场食堂工作人员在台风或者大汛等恶劣自然气候来临之前应做好各方面准备工作。
- (10) 当风电场启动公司防台预案及本风场抗台实施细则后，应向风场所有相关人员进行通知，风场主任、专职安全员、检修班成员都应赶赴生产现场进行



防台工作。

6.6.5 台风不同状态下的应急措施

(1) 当达到防台风警戒状态标准时，由公司宣布进入防台风警戒状态。公司第一责任人召开防台领导小组专题会议，了解信息，通报情况，分析预测可能出现的险情，部署抗台风工作，检查各级防台人员上岗到位及值班情况，安排抢修任务。公司根据实际情况的需要，立即组织若干工作组，进驻相应发生防台险情的地区，检查、督促、协调和指导防台工作。

(2) 当达到防台风紧急状态标准时，由公司宣布进入防台风紧急状态。公司第一责任人召开防汛领导小组专题会议，了解信息，通报情况，分析预测可能出现的更大险情，部署防台工作，检查各级防台人员上岗到位及值班情况，安排抢修任务。公司立即组织若干工作组，进驻相应发生防台险情的地区，检查、督促、协调和指导防台工作。

(3) 当达到防台非常紧急状态标准时，由公司宣布进入防台非常紧急状态。公司第一责任人召开防台领导小组专题会议，了解信息，通报情况，分析预测可能出现的最大险情，部署防台工作，检查各级防台人员上岗到位及值班情况，安排抢修任务。公司立即组织若干工作组，进驻相应发生防台险情的地区，检查、督促、协调和指导防汛工作。

6.6.6 台风袭击时的工作

(1) 台风正面袭击或台风在附近地区登陆，天气条件恶劣的时期，风电场一切抗台抢险救灾工作需分清轻重缓急，应从“保人身、保设备”角度出发，根据实际情况量力而行，切忌冒险行事。

(2) 所有抗台人员除中控楼留守值班员进行值班监视工作之外都应在职工宿舍内修整并随时待命，当有必要外出复位风电机并在条件许可时才出发至现场进行复位、巡视、抢修等工作。

(3) 中控值班室在台风期间应由当班班长统筹安排好人员进行 24 小时不间断值班监督盘查工作，监视设备运行情况及天气变化情况，根据实际情况应及时



向现场指挥领导及当班班长汇报情况

(4) 抗台现场指挥领导与当班班长应从实际情况出发在条件许可的情况下安排各项工作：应定时组织人员进行巡视检查；分组对各风场场地及道路进行巡视检查并复位发电设备；对气象站元件损坏的风电机进行抢修更换；对因过风速原因造成类似 DEWIND 风电机频繁起停的发电设备进行远控人工停机处理，保证其自动对风；对发生接地故障的 10KV 线路进行停电巡线处理，并进行抢修；处理各类突发事件。

6.6.7 灾后评估和恢复生产

发生抗台风险且有事故发生时，事故后除按照国家安全生产监督管理部门和电监会要求配合进行事故调查外，风电公司应组成事故调查组进行事故调查。

(1) **灾后评估** 抗台风工作结束后，风电公司协助投保的保险公司对损失进行定性及量化评估，并将评估结果存档，同时，要委派专人负责跟踪保险公司核赔理赔工作，督促保险公司理赔资金迅速到位。

(2) **恢复生产** 尽快恢复生产，将损失降低到最小。

注：本书第一章“影响中国大陆沿岸和近海地区的热带气旋气候特征”和第二章“热带气旋风场特性分析”由张容焱、张秀芝、李强、邢旭煌执笔，第三章“热带气旋对风电开发的影响”由吴金成执笔，第四章“沿海风电开发中台风应对策略”由梁志强执笔，第五章“风电场台风应急管理”由曲海滨执笔；最后由闫俊岳、张秀芝、杨校生统稿、修改定稿，经朱瑞兆审阅出版。



7 总结

本项目达到了预期目标，并取得了如下创新成果：

- 将登陆中国大陆的热带气旋分 8 个区域进行统计分析，发现浙江沿海、福建北部沿海区域登陆数随年代明显增加；浙江以北近海呈明显减少趋势；闽中、闽南和珠江口以东沿海年代际变化不大；粤西和雷州半岛、海南岛区域呈减少趋势；
- 利用非对称台风风场模型计算了中国近海 50km×50km 网格点热带气旋过程最大风速序列，由此得到了近海 50 年一遇最大风速分布和不同风机运行等级风速出现频率；
- 利用 85 座测风塔资料和大量地面气象资料，分析了 19 个热带气旋影响期间的水平风场、风垂直切变、湍流强度，揭示了距热带气旋中心不同距离、不同地形、不同下垫面、不同风向情况下风垂直切变、湍流强度变化特征；
- 利用中尺度数值模式 WRF，通过地形敏感性试验发现，在无地形情况下台风运动较快，台湾地形存在使台风在登陆前 3 个小时左右就开始减弱，登陆后地形影响了台风赖以维持或发展的动力和热力来源，使台风动力和热力场结构变得非对称，并且地形越高非对称性越明显，“眼区”堵塞越快、越剧烈；“眼壁”结构也越不完整。
- 《台风对中国近海风电开发的影响与对策》以沿岸和海上风电开发之科学问题和需求，集台风专家和风电专家之经验，从影响中国大陆沿岸和近海地区的热带气旋气候特征开始，逐步深入，阐述了热带气旋风场特性分析，热带气旋对风电开发的影响、沿海风电开发中台风应对策略以及风电场台风应急管理。内容新颖，结构严谨，图文并茂，具有知识性、可读性。