

风机基础风致疲劳损伤 机理、检测、设计与加固

◎吕伟荣 刘锡军 张家志 卢倍嵘 著

非外借

中国建筑工业出版社

风机基础风致疲劳损伤机理、检测、设计与加固

吕伟荣 刘锡军 张家志 卢倍嵘 著

资助单位：
湖南科技大学学术著作出版基金
湘电风能有限公司

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

风机基础风致疲劳损伤机理、检测、设计与加固/吕伟荣等著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2017. 9
ISBN 978-7-112-21085-5

I. ①风… II. ①吕… III. ①风机-疲劳-研究
IV. ①TH43

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 191625 号

本书共分为 8 章, 除第 1 章绪论外, 其余章节内容主要包括三大类: (1) 风机基础疲劳损伤机理及检测技术, 主要涉及第 2 章和第 8 章; (2) 基础环式风机基础受力性能、设计方法及加固技术研究, 主要涉及第 3~5 章以及第 7 章; (3) 基础环式风机基础有限元分析方法研究及优化分析, 主要涉及第 6 章。

本书适合风机科研工作者阅读, 也可供风机生产、设计、施工安装以及相关专业师生参考。

* * *

责任编辑: 刘瑞霞 武晓涛

责任设计: 李志立

责任校对: 李美娜 张 颖

风机基础风致疲劳损伤机理、检测、设计与加固

吕伟荣 刘锡军 张家志 卢倍嵘 著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京海淀三里河路 9 号)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京市安泰印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 11½ 字数: 284 千字

2017 年 9 月第一版 2017 年 9 月第一次印刷

定价: 35.00 元

ISBN 978-7-112-21085-5

(30735)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

风能作为清洁能源,有着取之不尽和易于利用的特点,具有广阔的发展前景。2015年4月,全球风能理事会(GWEC)发布的《全球风电发展年报》中指出,中国是目前全球风机风电新增装机容量增长最快的地区,并有望实现到2020年风电装机达200GW的目标。

但是,近年来随着我国内陆风机装机规模的不断扩大,作为主要承重部件的风机基础问题逐渐呈现出来。目前,我国内陆风机装机数量最大的基础形式是基础环式风机基础,其问题也是最多的。我国风机使用寿命仅为20年,但实际工程中存在部分风机机组在运行的初始阶段(2~5年)就出现因基础疲劳损伤而导致风机机组无法正常运行的情况,问题严重的需拆除重建,从而造成了巨大的经济损失。为此,风机基础疲劳损伤检测方法、疲劳损伤机理及设计方法等一系列问题有待进一步研究和完善。

湖南科技大学混凝土结构研究所自2009年以来,与湖南知名企业湘电风能有限公司长期合作,对风机基础疲劳损伤形成机理、受力性能、设计与加固方法以及风机基础疲劳损伤检测等问题展开了系统的研究,形成了一系列独具特色的研究成果。特别是2016年,部分研究成果还成功应用于某问题风机基础的加固工程中,并取得了良好的效果。作者希望通过本书向广大风机界的科研同仁们系统介绍我们开展的研究工作,共同推动我国风机事业的蓬勃发展。

本书共分为8章,除第1章绪论外,其余章节内容主要包括三大类:(1)风机基础疲劳损伤机理及检测技术,主要涉及第2章和第8章;(2)基础环式风机基础受力性能、设计方法及加固技术研究,主要涉及章节为第3~5章以及第7章;(3)基础环式风机基础有限元分析方法研究及优化分析,主要涉及第6章。

本书的编著工作分工为:吕伟荣主要负责第3~6章,卢倍嵘主要负责第7章,刘锡军负责第1章和全书的审核,张家志主要负责第2章和第8章。全书最后由吕伟荣统一定稿。

参加本书相关研究工作的科研人员主要有祝明桥教授、石卫华博士和丁时宝老师以及湘电风能有限公司的宋晓萍高级工程师、胡益民工程师和胡秋云工程师;研究生有李艳慧、孔德伟、王超飞、朱峰、翁红辛、徐驰、吴彬、彭柱、何潇锟、廖继彪等,在此表示衷心的感谢。本书的研究工作得到了湖南省自然科学基金委员会与湘潭市政府自然科学基金联合基金资助(14JJ5012);国家自然科学基金面上项目(51578235, 51378202, 51678234)等资助,特此致谢。

由于作者水平有限,加之撰写仓促,故书中难免存在许多不足之处,敬请广大读者予以批评指正,不胜感谢。

作 者

2017年6月于湖南科技大学

目 录

第1章 绪论	1
1.1 风能发展现状	1
1.2 风机基础研究现状	2
1.2.1 基础环式风机基础简介	2
1.2.2 风机基础研究概况	3
1.3 存在的问题	5
1.4 本书的主要工作	6
第2章 重力式风机基础风致疲劳损伤及演化机理	7
2.1 前言	7
2.2 问题风机基础疲劳损伤现场检测与分析	10
2.2.1 主风向基础混凝土表面可见裂隙	10
2.2.2 基础环附近表层混凝土冲压破损	11
2.2.3 基础环下法兰周边混凝土因反复研磨出现空腔	12
2.2.4 上穿筒钢筋疲劳脆断	13
2.2.5 上穿筒钢筋周边混凝土松散破损	15
2.3 风机基础疲劳损伤形成及演变机理	15
2.4 上穿筒钢筋强度验算	16
2.4.1 风机基础验算荷载	17
2.4.2 风机基础参数	18
2.4.3 极端荷载工况验算	18
2.4.4 疲劳强度工况验算	19
2.5 本章小结	20
第3章 基础环式风机基础现有设计方法及存在问题	21
3.1 风机基础设计作用及工况	21
3.1.1 作用	21
3.1.2 设计工况	21
3.1.3 主要荷载的分项系数	22
3.2 风机基础主要验算内容	22
3.2.1 基础偏心	22
3.2.2 基础底面压力	23

3.2.3	抗冲切验算	24
3.2.4	斜截面受剪承载力验算	25
3.2.5	基础底板配筋验算	25
3.2.6	基础裂缝宽度验算	26
3.2.7	地基变形	26
3.2.8	施工阶段抗倾覆验算	27
3.3	实际工程算例	27
3.3.1	设计资料	27
3.3.2	主要验算内容	28
3.4	现有设计方法存在的问题	30
3.4.1	风机基础混凝土疲劳损伤机理不明确	30
3.4.2	疲劳工况设计没有明确的设计方法	30
3.4.3	基础环与混凝土间的连接构造不充分	31
3.5	本章小结	31
第4章	风机基础混凝土与基础环粘结应力传递机理	32
4.1	前言	32
4.2	钢环与混凝土粘结作用分析	32
4.2.1	基础钢环与混凝土间的粘结锚固	33
4.2.2	基础钢环周围混凝土的应力状态分析	34
4.2.3	钢-混凝土结构研究的基本问题	34
4.2.4	钢环混凝土粘结滑移计算理论	36
4.2.5	影响粘结性能的因素	39
4.2.6	粘结应力传递理论	40
4.3	钢环与混凝土粘结应力传递机理试验研究	40
4.3.1	试件设计	41
4.3.2	试件制作	44
4.3.3	试验加载测量方案	45
4.3.4	试验加载过程	46
4.4	模型试验结果及分析	47
4.4.1	钢板-混凝土粘结试验结果分析	47
4.4.2	无粘结端部锚固试验结果分析	54
4.4.3	破坏试验结果与分析	56
4.5	本章小结	57
第5章	基础环穿环孔及钢筋抗剪承载力研究	59
5.1	前言	59
5.2	试验方案	60
5.2.1	试件设计	60

5.2.2	测量方案	62
5.2.3	加载方案	64
5.3	试验结果与分析	64
5.3.1	单孔推出试件试验结果及分析	64
5.3.2	三孔推出试件试验结果及分析	68
5.4	受力机理及承载力计算	84
5.4.1	国内外开孔钢板板连接件抗剪承载力公式研究现状	85
5.4.2	无穿筋试件	87
5.4.3	穿筋试件	87
5.5	本章小结	88
第6章	重力式风机基础有限元分析方法研究	89
6.1	前言	89
6.2	风机基础三维实体有限元分析研究	89
6.2.1	试验模型对比验证	89
6.2.2	风机基础整体有限元分析	95
6.2.3	风机基础有限元分析结果	99
6.2.4	风机基础优化设计研究	104
6.2.5	风机基础三维实体有限元分析小结	112
6.3	风机基础平面有限元分析模型	113
6.3.1	前言	113
6.3.2	试验模型对比验证	113
6.3.3	简化试验平面有限元模型	113
6.3.4	风机基础平面有限元分析	118
6.3.5	不同基础参数改进方案的优化	128
6.4	本章小结	133
第7章	风机基础加固设计方案及工程实例	134
7.1	前言	134
7.2	风机基础加固常采用的方案	134
7.2.1	风机基础环周边混凝土注浆加固方案	134
7.2.2	基础环局部栓钉加固方案	136
7.3	某问题风机基础栓钉加固方案实例	137
7.3.1	问题风机基础参数	137
7.3.2	荷载组合及系数选用	138
7.3.3	栓钉加固方案验算	139
7.3.4	基础加固验算	142
7.3.5	加固后效果	149
7.4	本章小结	150

第 8 章 风机基础疲劳损伤检测技术方法研究及应用 151

8.1 前言 151

8.1.1 基础环式风机基础常见疲劳损伤 151

8.1.2 风机基础损伤产生的原因 152

8.1.3 基础环式风机基础主要检测方法 153

8.2 风机基础现场检测准备工作 153

8.3 风机基础整体外观检测 154

8.3.1 检测方案 154

8.3.2 工程实例 155

8.4 风机基础环上法兰水平度检测 155

8.4.1 检测方案 155

8.4.2 工程实例 156

8.5 混凝土抽芯强度及密实度检测 157

8.5.1 检测方案 157

8.5.2 工程实例 158

8.6 混凝土表面回弹强度检测 159

8.6.1 检测方案 159

8.6.2 工程实例 159

8.7 混凝土密实度雷达检测 160

8.7.1 检测方案 160

8.7.2 工程实例 161

8.8 下法兰周边混凝土缺陷钻孔视频检测 161

8.8.1 检测方案 161

8.8.2 工程实例 162

8.9 风机塔筒垂直度测试 162

8.9.1 检测方案 162

8.9.2 工程实例 163

8.10 风机基础普查性检测内容..... 164

8.11 本章小结..... 164

附表 1: 共计 22 台已调查的问题风机基础, 其中 4 台因基础严重破坏而
需拆除重建..... 165

附表 2: 某风场全部 26 台风机基础现场检测结果简表 167

参考文献 168

第 1 章 绪 论

1.1 风能发展现状

能源是世界各国的经济命脉。近些年来,我国经济平稳快速发展,现代化程度不断提高,已经成为能源消耗大国。石油煤炭等常规能源,存在着较为严重的环境安全隐患,因此寻求新的能源以求优化电力的结构迫在眉睫。风力发电以其风能蕴量大、环境破坏小、装机速度快、投资回收期短等优点越来越受青睐。

风能是空气流动所产生的动能,是太阳能的一种转化形式。由于太阳辐射造成地球表面各部分受热不均匀,引起大气层中压力分布不平衡,在水平气压梯度的作用下,空气沿水平方向运动形成风。风能属于可再生能源,取之不尽用之不竭,它分布广、蕴含能量大;除此之外,利用风能发电在高度注重环境保护以及可持续发展的今天具有无可比拟的优越性。中国地域广阔,风力资源十分可观,仅次于美国和俄罗斯,居世界第三位。

国家气象局相关资料表明:我国在距离地面 10m 高度的风能资源总量约为 32.26 亿 kW,考虑到风能开发的可实施性等因素,我国近期可利用的风能为 8 亿 kW 左右,近海可利用风能是 2 亿 kW,陆上与海上年并网电量按等效满负荷计算的话,每年可以提供 2.5 万亿 kW/h 的电量,这相当于我国在 2005 年全年的用电。2007 年国家发改委公布《可再生能源中长期发展规划》,其中明确了风电发展的目标是到 2020 年达到 3000 万 kW。自 2005 年《可再生能源法》颁布后,并在其他政策激励和支持下,中国风电产业得到迅速发展。2015 年 1 月 31 日,国家能源司某副司长表示:“到 2014 年末为止,我国风电机组发电装机容量已经达到 4.4 亿 kW, 占有发电装机的 33%。其中,已经并入国家电网的风力发电机总容量为 9582 万 kW, 占世界风力发电机的四分之一。”

2015 年上半年我国风力发电行业资产总额达到 6864.08 亿元,较 2014 年同期同比增长 10.95%;我国风力发电行业总产值为 449.23 亿元,较 2014 年同期同比增长 13.25 %;2015 年上半年我国风力发电行业销售收入为 455.13 亿元,销售收入同比增长 12.44%;上半年利润总额为 130.93 亿元,利润同比增长 39.00%。2015 年风电投资完成 1159 亿元,同比增长 26.6%。

目前全球许多国家(80 多个)开始利用风能,不少国家更是将其当作主要发电方法。对风能的利用取得成功的原因可以归纳为两个方面:1) 技术的稳步发展;2) 基本价格的稳步下降。

2015 年世界风能协会公开了全球风电进展的报告,如图 1.1 和表 1.1 所示,报告表明了全球在过去一年风电发展状况。并且报告还公布了该协会对以后 5 年内世界风电发展形势进行的预估。这份预估表明,风电产业在将来五年内将持续增加。



图 1.1 2011—2015 年我国风电投资完成额统计图

2015 年全球各国风电装机容量统计一览表 (MW) 表 1.1

序号	国家或地区	装机容量 (MW)
1	中国大陆	145104
2	美国	74471
3	德国	44947
4	印度	25088
5	西班牙	23025
6	英国	13603
7	加拿大	11200
8	法国	10358
9	意大利	8958
10	巴西	8715
11	瑞典	6025
12	波兰	5100
13	葡萄牙	5079

世界风能协会最新预估表明，在以后 5 年内世界风机市场会以亚洲为首、欧洲和北美为主要地区。在以后 5 年世界风电市场会继续增加；至 2020 年末，世界风机建造总容量会靠近 800GW。

截至目前，作为可再生的清洁能源，在全球能源危机和环境危机日益严重的背景下，风能越来越受到高度重视，风电产业蓬勃发展，其前景不可估量。

1.2 风机基础研究现状

1.2.1 基础环式风机基础简介

相比海上风机而言，陆上风机发展较早，也较成熟。如今的陆上风电机组基础（风机基础）通常可分为重力式扩展基础、梁板式基础、桩承台基础、高台柱式基础、沉筒无张力基础及箱变-风机复合式基础，其中以重力式扩展基础应用最为普遍。其基础底面的形状一般有正方形、圆形、六边形、八边形。圆形基础因其径向多采用放射状配筋，这种配

筋形式使得基础内部的主拉应力方向一致,因而受力性能更为合理,更适合广泛使用。

重力式扩展基础支模便捷,施工简单方便,几乎适用于陆上所有的场地。但是由于大功率的风机基础需要承受很大的弯矩,基础底面积往往会很大,这使得混凝土的用量以及土方的开挖回填量都会大大增加。

如图 1.2、图 1.3 所示,基础环式风机基础的风机基础与塔架之间通常采用基础环进行连接的基础,基础环将直接承担上部塔架的荷载并把它传递到混凝土中,基础环上通过开孔穿钢筋的方式加强其与基础的连接。

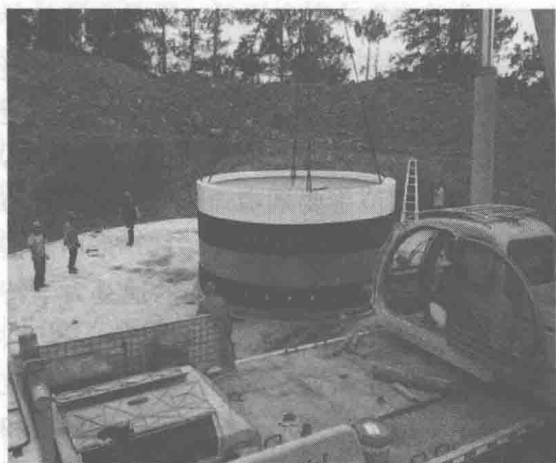


图 1.2 基础环吊装

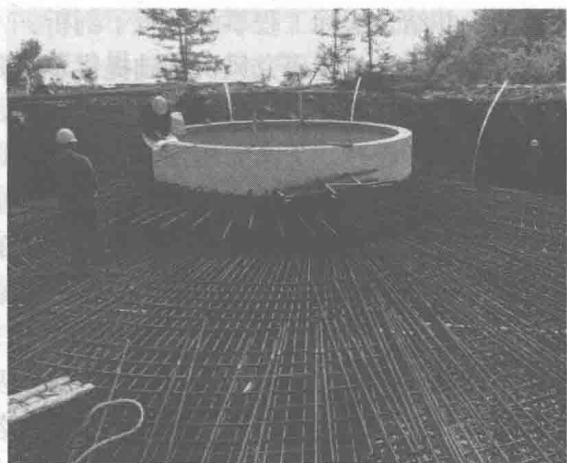


图 1.3 基础环钢筋设置

与其他形式的风机基础相比,基础环式风机基础的优点有:1) 施工便捷,工程经验丰富;2) 基础环式风机基础的上部法兰连接方式相同,易于标准化;3) 基础环的防腐与塔架的防腐方式相同,不存在后期使用过程中的防腐处理。同样的,基础环式风机基础也有其缺点,主要可以归结为以下几个方面:1) 混凝土基础连接部位存在刚度突变,基础环附近混凝土易发生疲劳破坏;2) 传统基础环本身设计偏柔,且在构造处理和细部处理方面存在着不少缺陷;3) 混凝土及钢筋用量大。

基础环式风机基础施工中基础环平面的平整度对结构的安全性影响很大,应控制在 2mm 以内,塔架与基础的连接应当保证水平和转动方向的稳定。基础持力层底部不应存在沉降较大的软弱下卧层。

1.2.2 风机基础研究概况

近年来国家的发展和进步,环保及可持续发展的观念深入人心,国家加大了对清洁能源的开发和利用,风力发电行业迅速发展,国内的学者对于风机基础的研究也在逐步加深,这为风机基础的设计和优化提出了宝贵的建议。在理论研究方面:王浩明等(2008)对几起风机基础质量事故进行剖析,结合我国试行的首部风机基础设计规范,对基础设计中的热点问题进行了探讨,并针对风机基础设计和施工中存在的问题提出了建议。马人乐等(2009)针对我国风力发电机组基础的设计现状,提出应当根据基础的受力特点以及实际工程地基土体种类对风机基础进行相应的改进和优化,并以两个实际风场为例阐述了基

础优化设计的可行性与经济性。刘学新(2013)等对圆形、六边形、正方形、八边形四种不同形状的重力式承台基础进行了结构计算,定性定量地阐述了它们的区别,为同类别基础设计提供了理论依据。席向东(2013)等对内蒙古某风场7台存在分层浇筑的风机进行了检测,通过钻芯和地质雷达探测等方法对混凝土密实度进行检测,同时考虑风机结构及荷载的特殊性,分析了分层面的影响,对不满足要求的基础采取压力注浆和分层面加设抗剪键的方法,加固后效果良好。周新刚(2014)分析总结了基础环式风机基础设计的主要原理和方法,根据基础环的受力原理,指出了当前基础混凝土承载力验算中所存在的问题和后果,并结合实际工程事故进行了剖析。

有限元法为学者研究风机基础提供了重要的手段。田静、许新勇等(2010)以某风电场实际工程为例建立了考虑非线性基础环式风机基础有限元模型,研究了其中钢筋混凝土的基本力学特性。天津大学练继建等(2011)建立了某基础环式风机基础的实体模型,对基础结构的细部损伤情况进行了分析,指出基础的损伤部位主要是基础环附近混凝土与受压侧基础底部混凝土,并提出了风机基础的合理细部尺寸。许新勇等(2012)采用大型通用有限元分析软件 ANSYS 建立了风机塔架基础有限元模型,研究了不同的地基力学特性对风机基础沉降的影响。贾献林等(2013)采用 ABAQUS 对不同荷载、材料、尺寸、埋置深度的风机基础基础环的应力、位移以及倾斜情况进行了研究。周新刚等(2014)应用有限元方法分析了某基础环式风机基础在各种工况下的应力与变形,结合现场的调查和检测结果得出基础环与混凝土之间粘结力的丧失是导致基础环上侧混凝土破坏的原因。康明虎等(2014)分析了基础环附近混凝土的受力情况,对可能的损伤原因进行了探讨,结果表明:基础环与混凝土的脱开将会使得局部应力的显著提升,且间隙越大应力水平越高。王超飞等(2014)采用 ANSYS 对风机基础的缩尺简化模型进行了模拟与分析,分析了其传力机理及应变分布规律,得出了合理的库仑摩擦本构的静摩擦系数。也有学者对风机基础进行了实验研究:马人乐等(2009)以某 750kW 的风机新型结构塔筒上反向平衡法兰为试验对象,对反向平衡法兰及连接塔筒的两个缩比例模型进行了静力加载试验,结果表明,这种法兰节点抗弯刚度好,极限承载力可达到设计荷载水平的 1.5 倍以上。孔德伟(2012)就风机基础环与混凝土的锚固机理、基础环与混凝土粘结应力传递机理展开了试验研究,确定了风机基础模型的埋置深度以及应力分布情况,为风机基础设计提供了试验依据。林木隆等(2015)采用大型模型试验对梁板式风机基础的受力变形特性进行研究,分析了竖向荷载作用下风机基础内桩、梁及土体等的受力特性。

国外的风电起步较早,技术相对成熟,在风机的设计计算方面考虑得比较完善,国外的风机大多数建在近海海域,因此国外的学者对于风机受力性能的研究主要是针对海上风机。Javier Serrano Gonza'lez 等人分析了风机地基基础的受力情况,并用进化算法对风机的整体布局进行了相关研究。Chris Horgan 提出风力机基础造价占整座风机的比例很大,因此对风机基础进行相关的优化研究十分必要。其通过有限元软件,分析了陆上和海上各类风机基础在风作用下的受力性能,然后结合风机总成本以及其他因素对风机基础进行了优化设计。Marie Maar 等分析了海上风电场风机机组基础对其所在海域的生态影响,并阐述了附着在基础上的海洋生物对基础强度的影响。Torgeir Moan 等通过有限元软件分析了近海风机基础的持久性,以及不同荷载作用下风机基础的频谱分析。分析结果表明,该类型基础薄弱点在折架上,且当风荷载和波浪荷载同方向时基础最容易发生破坏。S.

Bhattacharya 等认为风机的固有频率是风机设计中的一个重要因素,单桩基础可以看成是风机塔筒在地基土体中的延伸,考虑到桩土的相互作用,对风机基础进行了试验研究。考虑到不同的桩土接触方式,共进行了 17 组平行试验,结果及分析表明:不同的桩土接触方式能显著改变风机的固有频率和阻尼比。Ki-Yong Oh 等学者提出了一种海上桩基础风机基于桩与地基之间动态相互作用的数值分析方式,模型中同时施加了风荷载以及波浪荷载,通过分析得到了基础的桩的最大应力及弯矩,并对基础进行了设计优化。Jan Dubois 等人通过对导管架基础进行有限元分析,探索了桁架的连接方式对基础受力的相关作用。对 Y 形、K 形、X 形连接方式进行分析,并对该类型风机基础进行了设计优化,优化设计后的连接方式对风机基础抗疲劳能力增加有显著效果。Wei Shi 等人通过有限元软件分析了桁架的连接方式、海洋等外界环境对风机基础的影响以及基础环与混凝土之间的动力反应。结果表明:连接方式和外界环境对基础的动力频率作用较大,但对基础的本身频率作用较小。采用合适的连接方式能够有效地增加风机抗破坏能力。文献对近海海域的波浪荷载、风荷载、冰荷载等问题进行了讨论,并用有限元法验证了相关分析结果。

综上所述,虽然学者们针对风机基础做了一系列的调查和研究,但是大多数的研究只是局限在理论和有限元分析方面,研究尚存在一些不足的地方。

1.3 存在的问题

(1) 风机基础研究不够深入,风机基础混凝土疲劳损伤机理不明确

近年来随着我国风机机组大量投入使用,风机基础混凝土在经年累月的风荷载作用下常出现明显的主风向基础环与混凝土间的脱开裂隙和混凝土压溃,基础环水平偏差过大导致风机塔筒倾斜严重而触发振动报警,影响正常运行。更有甚者基础环上部穿筒钢筋大面积疲劳脆断,基础环下法兰处因基础环晃动而造成其周边混凝土严重磨损形成空腔,风机塔筒因下部脱开裂隙过大而晃动剧烈,导致风机机组必须停机检修。

以上种种,因风荷载导致的疲劳损伤机理目前开展的试验和理论研究相对较少,不能有效地指导设计。

(2) 设计中未全面考虑疲劳荷载工况验算

目前国内风机基础设计规范中,《风电机组地基基础设计规定》FD 003—2007 中将基础环风机基础视作一个整体的柱下独立基础,根据其极限荷载和正常运行工况进行基底压力、混凝土冲切等各项静力承载力相关的验算,而对于疲劳工况验算就是简单的 5.0.8 条中所列的“材料的疲劳强度验算应符合 GB 50010 的规定”,未就具体验算部分及方法给出明确的说明,过于简单,很难指导工程设计。

(3) 现有设计构造措施不能有效地保证混凝土对插入基础环进行有效地嵌固

风机基础混凝土大量的现场损伤检测结果表明,基础环与混凝土界面间往往先因混凝土压溃,形成脱开裂隙后导致风机摇晃加大,周而复始随着压溃区与脱开裂隙向下扩展,混凝土对基础环的嵌固作用逐渐失效而摇摆加剧。而目前,风机基础环上除了上下两排穿环钢筋及穿环孔内混凝土形成的榫卯抗剪外,未有其他有效地措施抑制混凝土压溃区与脱开裂隙向下扩展,混凝土基础构造上应采取进一步有效地措施加强混凝土与基础环间界面

抗剪能力,保证混凝土对插入基础环进行有效地嵌固。

(4) 加固方案不成熟,有待时间检验

截至目前,我国大部分风机机组为新建机组,总体运行时间不长,对于问题风机基础的加固处理方案尚不成熟,缺乏长期跟踪观测的数据予以验证。

(5) 施工中常存在混凝土振捣不密实等质量问题

根据计算及构造要求,基础环式风机基础配筋往往较多,特别是表层钢筋间距往往形成了 200mm 左右的网格,加之基础混凝土浇筑深度一般为 3m 左右且不允许分段浇筑,导致浇筑时工人现场振捣工作量大,稍有质量意识欠缺及现场监管不到位,极易造成下部混凝土振捣不密实,混凝土强度不达标的质量问题。

(6) 现有的检测方法及手段不多,且不成熟全面

目前,风机基础表层混凝土压溃及脱开裂隙容易探测,但基础环下法兰的磨损空腔及上部穿环钢筋疲劳脆断等基础内部损伤无法有效检测,而这些损伤往往是非常严重的,能否有效地检测对于风机基础加固处理决策至关重要。

1.4 本书的主要工作

针对目前基础环风机基础在研究、设计及现场疲劳损伤检测基础上存在的不足,课题组先后得到了湖南省自科基金委及国内风电厂家及业主的大力支持,自 2009 年起开展了一系列的研究,形成一系列的研究成果并汇集于此书,其各章主要内容如下:

第 2 章主要通过近年来对国内多台问题风机基础进行现场勘查和实测,重点研究了目前基础环式风机基础中普遍存在的各种风致疲劳损伤,提出了基础环式风机基础疲劳损伤形成及演变机理;并根据风机厂家提供的风机基础荷载,对主风向最不利的上穿筒钢筋进行了极端荷载和疲劳强度工况验算。

第 3 章主要是基于我国《风电机组地基基础设计规定》FD 003—2007 规范要求,结合工程实际算例对基础环式风机基础现有设计方法进行了介绍,并就当前设计方法存在的问题进行了阐述。

第 4 章主要是基于微元思想,将大型风机基础简化为 $1/4$ 缩放比例微元模型试件进行拉拔试验,研究钢与混凝土粘结传递机理,提出了粘结应力分布理论表达式。

第 5 章基于风机基础常采用的开孔板连接件构造,考虑多孔受力影响,共进行了 4 组 12 个开孔板连接件的推出试验,并推导出抗剪承载力,为其极端和运行工况设计提供依据。

第 6 章基于非线性接触模型,分别采用三维实体单元和平面单元建立了风机基础有限元分析模型,通过与试验模型进行对比验证,对风机基础进行参数分析和优化设计取值。

第 7 章依据课题组参与的某实际问题风机基础加固实例,对目前采用较多的几种风机基础加固方案进行重点阐述,为实际工程应用提供参考。

第 8 章结合工程检测实例,对目前风机基础常采用的检测方法进行详细阐述,为实际工程应用提供参考。

本书部分研究成果现已应用于实际工程中,并取得了良好的效果,适合在国内风电场中大范围推广。

第 2 章 重力式风机基础风致疲劳损伤及演化机理

2.1 前言

近年来，随着我国内陆风机装机规模的不断扩大，作为主要承重构件的风机基础疲劳问题逐步呈现出来，其中尤以基础环式风机基础问题较为突出。基础环式风机基础为钢筋混凝土柱下独立基础形式，如图 2.1、图 2.2 所示，工程中将基础环（风机钢筒埋入混凝土部分）直接插入基础混凝土中，基础环设上下法兰，其中上法兰用于连接上部风机钢筒。为防止风机倾覆，风机基础环沿周边开孔，设上下 2 道穿筒钢筋连接内外，每道共计 72 根，如图 2.3 所示。基础环式风机基础依靠自身的重力来维持结构的稳定与强度，设计简单，可适合于任何地形与地质条件，是目前应用较为广泛也是数量最多一种。

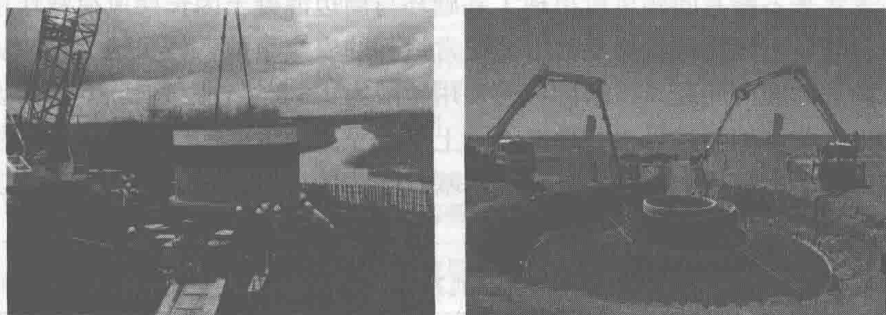


图 2.1 基础环式风机基础现场施工

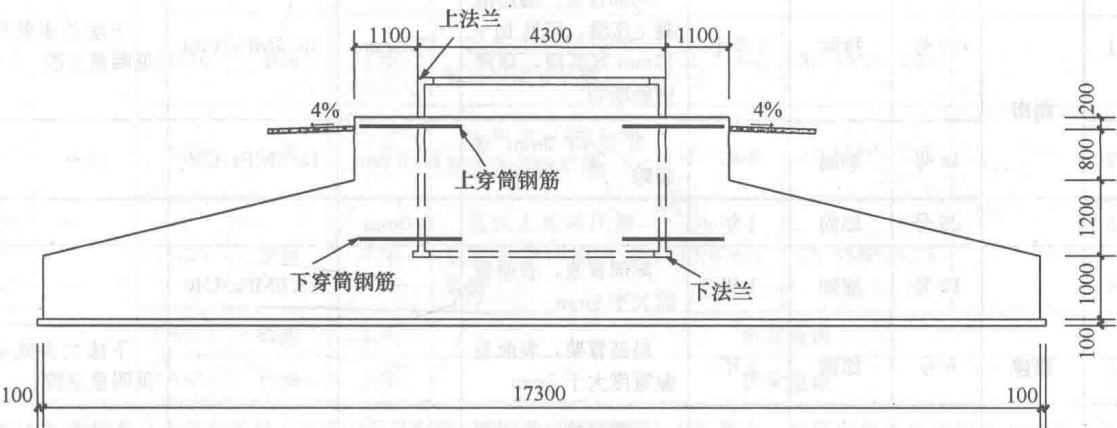


图 2.2 基础环式风机基础简图

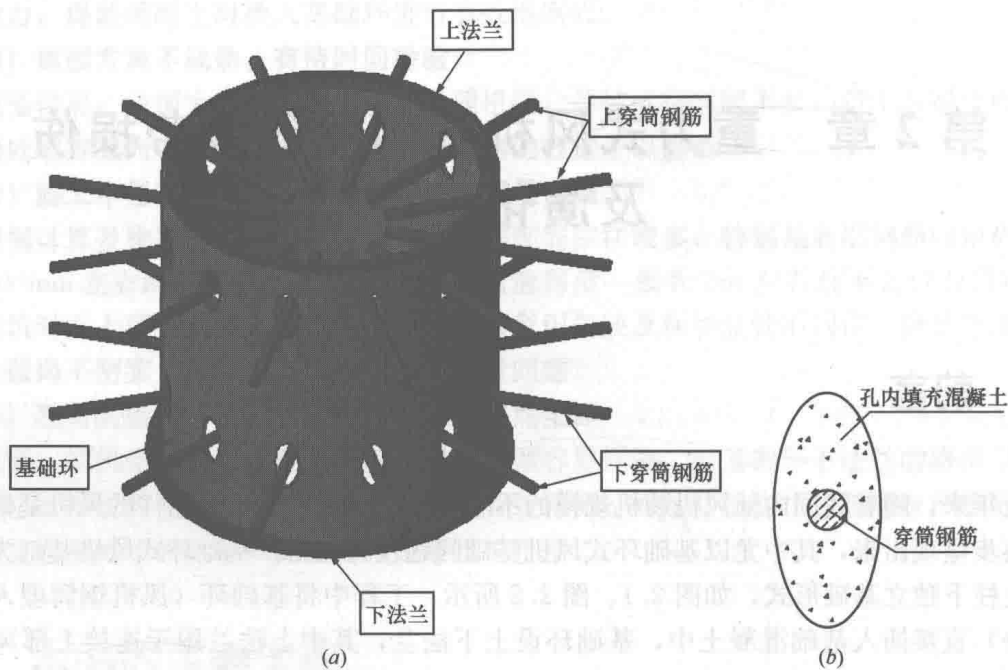


图 2.3 基础环穿筒钢筋示意图
(a) 基础环及穿筒钢筋三维图；(b) 穿筒钢筋详图

但是，近年来不断有问题风机出现了基础环与周边混凝土因长期风荷载作用导致脱开严重，进而引起风机钢筒倾斜晃动而不能正常运行的安全事故，详见表 2.1。从表 2.1 可知，本章所调查的国内问题风机基础普遍使用年限为 1~5 年，距离其 20 年的设计基准期还相差甚远，表明基础环式风机基础在设计上未能充分考虑疲劳影响，长此以往问题风机数量将会越来越多，亟须解决。截至目前，基础环式风机基础的研究主要还是以静力分析为主，对其疲劳损伤机理尚不明确。

国内多台问题风机基础现场检测结果 表 2.1

编号	问题风机	编号	处理方案	运行时间	现场外观检测	水平度最大偏差	混凝土抽芯强度/设计强度	视频探孔
1	湖南	10 号	拆除	5 年半	局部冒浆，表层混凝土压溃，可见 10~15mm 宽裂隙，穿筒钢筋断裂	16.5mm	16.6MPa/C30	下法兰多处可见明显空腔
2		18 号	加固	5 年	可见约 2mm 宽裂隙	11.3 mm	14.5MPa/C30	—
3		26 号	加固	1 年	—	6.0mm	—	—
4	福建	12 号	加固	1 年	局部冒浆，表面裂隙大于 5mm	—	13.0MPa/C40	—
5		6 号	加固	3 年	局部冒浆，表面裂隙宽度大于 5mm	—	—	下法兰多处可见明显空腔
6		13 号	加固	3 年	局部冒浆，表面裂隙大于 5mm	—	—	下法兰多处可见明显空腔

续表

编号	问题风机	编号	处理方案	运行时间	现场外观检测	水平度最大偏差	混凝土抽芯强度/设计强度	视频探孔
7	福建	14号	加固	3年	局部冒浆，表面裂隙大于5mm	—	—	下法兰多处可见明显空腔
8	江西	44号	加固	1年	局部冒浆，基础环脱开裂隙约10mm	13.0 mm	31.6MPa/C40	下法兰多处可见明显空腔
9	沈阳	13号	加固	—	局部冒浆，明显可见基础环脱开裂隙	—	—	下法兰处可见明显空腔
10	江西	13号	加固	1年	局部冒浆，表层混凝土压溃，明显可见基础环脱开裂隙	—	—	下法兰多处可见明显空腔
11	福建	30号	加固	1年	局部冒浆，明显可见基础环脱开裂隙	—	低于 C35 设计值	—
12		31号	加固	1年	局部冒浆，明显可见基础环脱开裂隙	—	低于 C35 设计值	—
13	江苏	27号	拆除	—	冒浆，明显可见严重基础环脱开裂隙和混凝土压溃	—	—	局部破拆可见穿筒钢筋剪断和下法兰空腔
14	辽宁	28号	待加固	3年	冒浆，明显可见严重基础环脱开裂隙和混凝土压溃	—	—	—
15	江苏	39号	待加固	9年	冒浆，明显可见脱开裂隙可混凝土压溃	—	—	—
16	周新刚论文	—	—	—	冒浆，表层混凝土压溃，明显可见脱开裂隙，穿筒钢筋断裂	—	满足设计要求	—
17	贵州	ZAS27	加固	1年	混凝土局部压溃，基础表面有龟裂现象	19.5 mm	20.8MPa/C35	—
18		HZ16	加固	1年	混凝土局部压溃，基础表面较平整	11.7 mm	33.9MPa/C35	
19		HZ21	加固	1年	混凝土局部压溃，基础表面较平整	16.1 mm	31.8MPa/C35	
20		HZ24	加固	1年	混凝土局部压溃，混凝土表面有大量裂缝	10.6 mm	33.6MPa/C35	
21								
22		ZAS24	拆除	1年	拆除重建			
	ZAS26	拆除	1年	拆除重建				

注：基础环水平度测量最大偏差为沿基础环一周均匀布置若干个水准测点，经现场测量得到的最大水准测量高差值。