

专著 西北工业大学
精品出版项目
ZIZHU XIANGMU

ZHUANZHU

风力机设计理论与结构动力学

廖明夫 宋文萍 王四季 王伊凯 等编著

ZHUANZHU

西北工业大学出版社

TM315
36

014041605

本书在编写过程中，参阅了国内外许多文献，特别是近年来国内外风力发电领域的最新研究成果，力求做到概念清晰、重点突出、由浅入深、循序渐进。本书可作为高等院校能源动力类、机械类、电气工程及其自动化专业及相关专业的教材，也可供从事风力发电工作的工程技术人员参考。

西北工业大学专著出版基金资助项目

风力机设计理论与结构动力学

廖明夫 宋文萍 王四季 王伊凯 等编著



图书在版编目(CIP)数据

风力机设计理论与结构动力学 / 廖明夫, 宋文萍, 王四季, 王伊凯 等编著. — 北京: 西北工业大学出版社, 2013.12.
ISBN 978-7-5612-3889-8
I. ①风… II. ①廖… III. ①风力机—理论—研究 IV. ①TM315
中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第018333号

出版发行: 西北工业大学出版社
通信地址: 西安长安南路127号 邮编: 710075
电话: (029)8843384 88491257
网址: www.nwpu.com



TM315

西北工业大学出版社

36

01010100

【内容简介】 本书深入地介绍了风湍流理论和湍流模型,系统地论述了翼型理论、设计和实验方法。本书引入动态入流理论,分析了非稳态流动条件下风力机的载荷;建立了风力机整机动力学模型,介绍了模态分析方法和系统仿真方法,并结合风力机结构动力学,分析了控制策略的稳定性;介绍了风电场 SCADA 系统,阐述了叶轮动平衡理论以及风力机不对中产生的机理,并给出了实例。

本书包含了笔者在风电领域研究和研发多年的成果和经验。特别是风力机的翼型设计、气动和结构设计、载荷计算、稳定性分析、风电场监测、现场动平衡等方面的内容,可直接作为风电工程师的设计指南。另外,本书中包含大量的图、表和数据,与正文文字相得益彰,有助于读者理解掌握。

本书可用作风电机组设计师的指导书、风电专业的教科书,也宜作为参考书,供风电技术人员使用。

李四王 李四王 李四王 李四王 李四王

图书在版编目(CIP)数据

风力机设计理论与结构动力学/廖明夫等编著. —西安:西北工业大学出版社, 2013.12

ISBN 978-7-5612-3899-8

I. ①风… II. ①廖… III. ①风力发电机—设计—理论研究②风力发电机—结构动力学—研究 IV. ①TM315

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 012932 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwup.com

印 刷 者:陕西向阳印务有限公司

开 本:727 mm×960 mm 1/16

印 张:20.75

字 数:372 千字

版 次:2014 年 2 月第 1 版 2014 年 2 月第 1 次印刷

定 价:55.00 元

前 言

风能利用的高速发展,引起全球的关注。我国在短短几年间,跃居风电装机容量全球第一,在世界十大风电机组制造商中,我国有四家。但对于这一新兴的交叉学科领域,我国在人才、技术、装备等方面基础薄弱,风电机组的自主设计仍然是我国风电行业的“短板”,急需从理论、方法、经验以及学科交叉的角度提供指导和支持。

另外,风电机组单机容量和尺寸也在快速增大,从 20 年前单机额定功率约 600 kW、叶轮直径约 50 m 增大到今天的单机容量为 6.5 MW、叶轮直径约为 150 m 的规模。结构柔性加大,流耦耦合效应更加突出,气流非稳态流动的影响增大,结构与控制系统之间、子结构与子结构之间、机组与电网之间耦合增强。这些变化给大型风电机组的设计、运行和维护带来了空前的困难。

为此,笔者在长期从事风力发电技术人才培养和科学研究的基础上撰写《风力机设计理论与结构动力学》专著,旨在为风电机组设计人员提供设计参考,为风电专业教育提供专业教材,以抛砖引玉,稍缓当前行业之急需。

本书深入地介绍了风特性、湍流理论和湍流模型,为非稳态流动条件下风力机载荷分析奠定基础。湍流是风的特性之一,也是在风力机上产生动载荷的主要来源。我国地域辽阔,风况多变,风湍流的形式可能会不同。因此,不同地域运行的风电机组所受的动态载荷可能差别较大。设计风力机时,应运用对应的湍流模型,预估载荷。若干学者正在研究风湍流,拟针对我国典型风况,建立相应的湍流模型。国际标准 IEC 61400—1: Design Requirements—2005 推荐使用 Mann 模型。Mann 模型涉及的理论非常复杂,一般的设计人员难于理解,应用时也难于入手。为此,本书对 Mann 模型进行了深入的分析,详细研究了 Mann 模型的推导过程和求解步骤,以支持对 Mann 模型的理解和运用,有助于改进湍流模型。

我国一直无支撑风力机叶片设计的翼型族。西北工业大学乔志德教授和宋文萍教授在“863”项目支持之下,研制出我国第一套风力机叶片翼型族。本书以此

成果为基础,系统地论述翼型理论、翼型设计和实验方法、不同翼型的特点以及应用。

当进行风力机设计时,一般情况下,采用稳态动量-叶素理论(Betz 和 Schmitz 理论,或者 Glauert 理论)进行风力机的气动设计和载荷计算。这对于中、小型风电机组是合适的。但对于大型风电机组,叶片在风载荷作用下,变形很大,非稳态流动的影响不能忽略。另外,在变工况过程中(如偏航、变桨等),风的非稳态特性更加突出,作用在叶片上的动载荷会很大,利用经典的动量-叶素法计算载荷不完全适合。因此,本书在介绍稳态动量-叶素理论的基础上,引入动态入流理论,以分析非稳态流动条件下风力机的载荷,并与美国可再生能源实验室的测试结果进行比较。从结果可以看出,非稳态流动的影响确实是明显的,在载荷分析中应予以考虑。

近年来,大型风电机组故障率较高,而振动故障是其中主要故障之一。笔者在 15 个风电场对 60 多台风电机组进行了振动测试和诊断。测试和诊断结果说明,结构动力学设计以及结构动力学与控制耦合设计必须要贯彻到风电机组的设计之中。为此,本书建立了风力机整机和主要部件的动力学模型,介绍了模态分析方法和系统仿真方法,阐述了变桨变速风力机的控制策略,并与风力机结构动力学相结合,分析了控制策略的稳定性,列举了力矩控制和偏航控制引起的风力机失稳振动实例。这些内容都是风力机控制系统设计的要点。

针对风电机组的运行和维护,介绍了风电场 SCADA 系统的原理和设计,提出了利用变桨信号和转速信号监测风电机组振动故障的方法,详细阐述了风力机叶轮动平衡理论,以实例说明了叶轮现场动平衡的步骤和效果。轴系不对中是大型风电机组频发的严重故障。齿轮箱和发电机故障很大一部分是由不对中引起的。本书全面剖析了不对中产生的原因,分析了多爪弹性联轴器的受力和变形,揭示了风力机不对中的振动特征,并给出了诊断实例。

本书包含了笔者在风电领域教学、研究和研发多年的成果和经验,特别是风力机的翼型设计、气动和结构设计、载荷计算、稳定性分析、风电场监测、现场动平衡等方面的内容,可直接作为风电工程师的设计指南。另外,书中包含大量的图、表和数据,与正文文字相得益彰,章节相对独立,有助于读者理解掌握。本书可用作风电机组设计师的指导书、风电专业的教科书,也宜作为参考书,供风电技术人员使用。

本书共分 8 章,各章的内容安排如下:

第 1 章介绍了风特性,特别是对风湍流理论进行了详细论述。湍流模型是描述风特性的重要手段。在国际标准 IEC 61400—1 中推荐了三种湍流模型。本章系统地解读了这三种湍流模型,对其中的 Mann 模型进行了深入的分析,详细研究了推导过程和求解步骤,并发现和更正了国际标准 IEC 61400—1 中的错误,以支持对 Mann 模型的理解和运用。

第 2 章介绍了风力机翼型的设计。翼型是风力机叶片设计的基础。本章首先介绍翼型空气动力学的基础知识,包括翼型的几何定义和主要气动参数、翼型的分类与性能特征、翼型的基本技术要求、翼型气动特性与几何特性的关系,描述风力机翼型相对于传统航空翼型的特殊性和国外已有的风力机翼型及新风力机翼型的特点,阐述目前发展的风力机翼型气动特性分析方法与设计方法。最后介绍了 NPU-WA 风力机翼型族的设计、风洞实验和性能指标。该翼型族是在本章笔者承担的“十一五”国家高技术研究发展计划目标导向类项目《先进风力机翼型族的设计与实验研究》中,以乔志德教授为主专门针对兆瓦级风力机叶片设计的翼型族。

第 3 章介绍了风力机的动量-叶素设计方法,论述 Betz 和 Schmitz 理论,这是风力机设计的基础。

第 4 章针对大型风力机,提出了对动量-叶素理论的修正,以用于偏航状态和考虑动态入流的气动载荷计算。考虑了非稳态的气流流动以及尾迹效应,计算结果与美国可再生能源国家实验室的实验结果进行了对比,便于读者理解和应用。

第 5 章和第 6 章运用传递矩阵法对风力机进行建模和模态分析,为风力机结构动力学设计提供方法和工具。

第 7 章描述了风力机的控制策略和方法。把控制策略与结构动力学相结合,分析系统的稳定性,以指导控制系统的设计。

第 8 章介绍了风电场监控系统(SCADA 系统)的设计、风力机现场动平衡技术以及风力机不对中故障的机理和治理方法,并列实例加以说明。

本书前言由廖明夫撰写。第 1 章由廖明夫、赵文超、刘前智编写。第 2 章由宋文萍、韩忠华、余雷、刘俊编写。第 3 章、第 4 章、第 5 章和第 6 章由廖明夫、黄巍、王四季、王俨凯、董礼编写。第 7 章和第 8 章由廖明夫、马振国、吕品、王四季、王俨凯、宋晓萍、杨伸记编写。廖明夫对全书进行了统编和校对。尹尧杰负责最终的统

稿、校对和图、表修正。本书有关 NPU-WA 翼型族设计的主要内容是在 **乔志德** 教授的专著、论文、科研报告、讲座演讲稿的基础上,结合笔者的研究体会撰写的。谨以此书表达对乔老师的深切怀念。

在编写过程中,R. Gasch 教授、贺德馨教授和施鹏飞教授给予了很多帮助和支持,在此表示特别的感谢。笔者感谢西北工业大学、柏林工业大学旋转机械与风能装置测控研究所以及风力机翼型设计“863”课题组的全体同仁。

感谢国家技术研究发展计划课题 2007AA052448 和 2012AA051301 的支持,感谢美国可再生能源实验室(NREL)提供的实验测试数据。最后感谢西北工业大学出版社的大力支持!

因编写时间仓促,水平有限,书中不当之处,恳请读者谅解和指正。

编著者

2013 年 7 月

目 录

第 1 章 风资源与风湍流	1
1.1 风的形成	1
1.2 平均风速特性	4
1.3 脉动风速的特性	6
1.4 湍流模型及湍流理论.....	10
参考文献	32
第 2 章 风力机翼型族设计与风洞实验	35
2.1 翼型空气动力学的基础知识.....	35
2.2 风力机翼型的特点与国外风力机翼型.....	54
2.3 风力机翼型气动特性计算与设计方法.....	62
2.4 NPU - WA 风力机翼型族设计	80
2.5 NPU - WA 风力机翼型风洞实验	85
2.6 NPU - WA 风力机翼型族的气动特性	92
2.7 总结与展望.....	99
参考文献	99
第 3 章 风力机叶轮气动设计	104
3.1 基于经典动量-叶素理论的叶轮气动设计.....	104
3.2 风力机设计参数的选择及实际设计中要考虑的因素	111
3.3 风力机定常流动载荷分析	119
3.4 风轮气动设计实例	124
参考文献.....	129

第 4 章 风力机气动载荷计算	131
4.1 风力机坐标系	131
4.2 动态失速对风力机气动载荷的影响	133
4.3 偏航状态下的动量-叶素理论.....	140
4.4 基于动态入流的动量-叶素理论.....	147
4.5 载荷计算程序及分析结果	152
参考文献.....	165
第 5 章 风力机模态分析	167
5.1 叶片建模及模态分析	167
5.2 塔架建模及模态分析	176
5.3 风力机整机模态分析	185
参考文献.....	192
第 6 章 变桨变速风力机系统建模及仿真	194
6.1 叶轮	194
6.2 传动链及发电机	203
6.3 塔架	207
6.4 控制系统	210
6.5 仿真系统的实现	215
6.6 风力机系统状态空间描述及模型线性化	217
参考文献.....	219
第 7 章 风力机控制策略及其稳定性	220
7.1 变桨控制的增益调节	220
7.2 变速和变桨控制的联动及过渡区的控制	222
7.3 控制策略对风力机结构动力学的影响	227
参考文献.....	247

第 8 章 风电机组的运行与维护	249
8.1 风电机组叶轮不平衡	249
8.2 风电机组传动链不对中问题	259
8.3 风电机组轴承的故障诊断	284
8.4 风电场监控与数据采集系统	298
参考文献	308
附录	311
附表 1 深沟球系列轴承的故障特征倍频	311
附表 2 角接触球系列轴承的故障特征倍频	317
附表 3 圆柱滚子系列轴承的故障特征倍频	320

第 1 章 风资源与风湍流

正确了解风特性是风电项目规划与风力机设计的基础。湍流是风的特性之一,也是在风力机上产生动载荷的主要原因。我国区域辽阔,风况多变,风湍流的形式可能会不同。因此,不同区域运行的风力发电机组(简称风电机组)所受的动态载荷可能差别较大。设计风力机时,应运用对应的湍流模型,预估载荷。若干学者正在研究风湍流,拟针对我国典型风况,建立对应的湍流模型。国际标准 IEC 61400—1: Design Requirements—2005 推荐使用 Mann 模型。Mann 模型涉及的理论非常复杂,一般的设计人员难于理解,应用时也难于入手。

为此,本章深入地介绍了风特性、湍流理论和湍流模型,对 Mann 模型进行了深入的分析,详细研究了推导过程和求解步骤,以支持对 Mann 模型的理解和运用。在本章中,首先论述风的形成、风系;其次阐述大气附面层内平均风速的特性,包括风切变、平均风速的分布和风向分布;然后介绍脉动风速的特征,包括风湍流时间相关、空间相关和风功率谱等;最后,总结风能工程中常见的风湍流模型,并对 von Karman 各向同性模型和 Mann 模型中所涉及的流体力学基本理论和谱张量表达式推导过程作了详细论述。

1.1 风的形成

1.1.1 风形成的原因

在相同高度上,两点之间的大气压差是形成空气流动的原因。而大气压差主要是由于大气层中不同时间和空间内空气所接受的太阳辐射强度不同造成的。受到地理纬度、下垫面物理属性等因素的影响,地球表面接受到的太阳辐射是不均匀的,使得空气的加热不均匀,从而产生了温度差和压力差。单位距离间的气压差叫作气压梯度,气压梯度力是由大气压差产生的力,并且方向始终指向低压区。

由于地球自转的存在,因此空气还受到科氏力的作用,科氏力也称为地球偏转力。在科氏力作用下,北半球气流向右侧偏转,而南半球的气流始终向左偏转^[1]。这样,风向并不是完全沿气压梯度力的方向,而是要发生一定的偏转。大气真实运动是这两种力影响的结果。

自由大气中,如果等压线是直线,那么当气压梯度力和地转偏向力相平衡时,空气运动将沿着等压线方向作水平等速直线运动,这种空气运动称为地转风。地转风是平衡运动,它受到的合外力等于零,没有加速度。

自由大气中,如果等压线是曲线,那么当水平气压梯度力、地转偏向力、惯性离心力这三个力达到平衡时,空气水平运动称为梯度风。风沿等压曲线作惯性等速曲线运动^[1-3,5-6]。

1.1.2 大气环流

大气环流,一般是指大范围的大气运行现象,既包括平均状态,也包括瞬时现象。其水平尺度是最大的,在数千千米;垂直尺度在 10 km 以上;时间尺度是最长的,在数天以上。通常认为影响大气环流的主要因素有太阳辐射、地球自转、海陆分布不均匀等。

大气环流的主要表现:全球尺度的东西风带、三圈环流^[2](哈得莱环流、费雷尔环流和极地环流)、定常分布的平均槽脊、高空急流以及西风带中的大型扰动等。大气环流既是地-气系统进行热量、水分、角动量等物理量交换以及能量交换的重要机制,也是这些物理量的输送、平衡和转换的重要结果。

三圈环流又称为行星风系。地球上的风带和湍流是由三圈环流所推动的。三圈环流在地面附近的流场上形成了低纬度东北信风带、中纬度信风带及高纬度东北风带。而在高空流场中,形成了低纬度西风带、中纬度东风带和高纬度西风带,如图 1-1 所示。三圈环流是一个理想化的模型,实际的环流要比三圈环流理想模型复杂得多。另外,在高空流场中,都是西风占据主导风向^[1-3,5-6]。

1.1.3 季风和局地环流^[1-3,5-6]

大气环流是全球尺度上的大气循环。季风和局地环流则属于区域性的大气环流。季风和局地环流对风能利用有重要影响,必须加以了解。

1. 季风

大范围风向随季节而有规律改变的盛行风称为季风。季风主要是由于海陆热力差、行星季风和高原的地形作用引起的,并形成了海陆季风、行星季风。青藏高原夏季的热源作用和冬季的冷源作用对维持和加强南亚季风起到了重要的作用。

我国是一个季风型气候国家,主要受到东亚季风的影响。东亚季风的夏季风主要特征是高温、潮湿、多阴雨、来临慢;冬季风的特征是来临快、强度大、大风、干冷等。

2. 海陆风

海陆风是由海面 and 陆地之间的昼夜热力差异而引起的。白天由海面吹向陆地的风,称为“海风”;夜间由陆地吹向海面的风,称为“陆风”。海陆风是以一天为周期进行变化的。

海陆风的强度在海岸线附近最大。随着远离海岸线,海陆风的强度逐渐减小。海风的风速一般比陆风的大,可达 $4\sim 7\text{ m/s}$,而陆风一般只有 2 m/s 左右。在低纬度地区,日照射比较强,因此,海风比较明显,特别是在夏季。

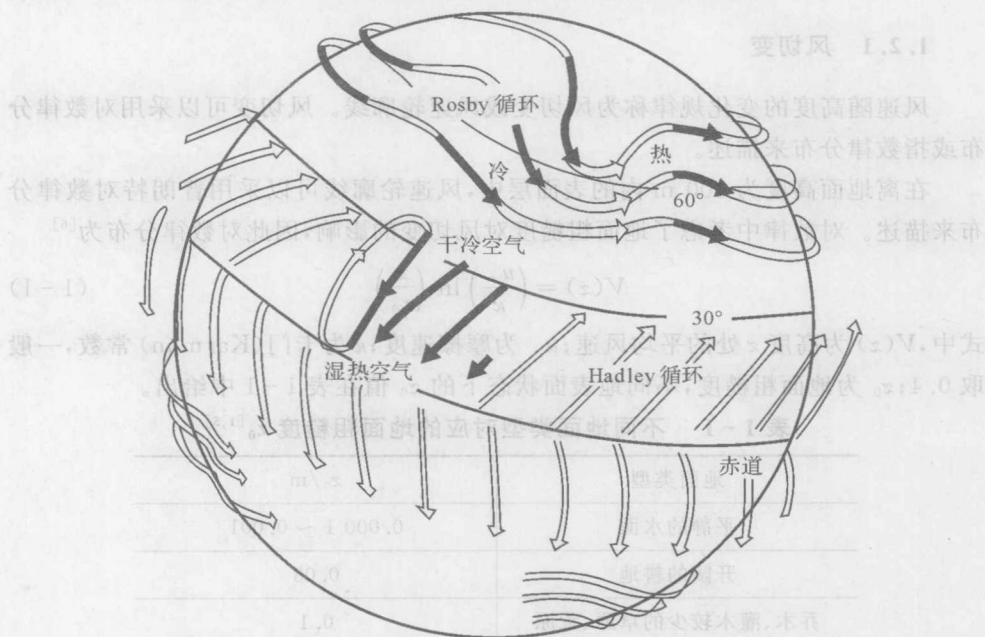


图 1-1 全球风系^[3]

3. 山谷风

山谷风的形成原理跟海陆风是类似的。白天,山坡接受太阳光热较多,成为一只小小的“加热炉”,空气增温较多;而山谷上空,同高度上的空气因离地较远,增温较少。于是山坡上的暖空气不断上升,并在上层从山坡流向谷底,谷底的空气则沿山坡向山顶补充,这样便在山坡与山谷之间形成一个热力环流。下层风由谷底吹向山坡,称为谷风。到了夜间,山坡上的空气受山坡辐射冷却影响,“加热炉”变成了“冷却器”,空气降温较多;而谷地上空,同高度的空气因离地面较远,降温较少。于是,山坡上的冷空气因密度大,顺山坡流入谷地,谷底的空气因汇合而上升,并从

上面向山顶上空流去,形成与白天相反的热力环流。

谷风的平均速度约为 2~4 m/s,有时可达 7~10 m/s。谷风通过山隘的时候,风速加大。山风比谷风风速小一些,但在峡谷中,风力加强。谷风所达厚度一般在谷底以上 500~1 000 m,这一厚度会随气层不稳定程度的增加而增大。

1.2 平均风速特性

1.2.1 风切变

风速随高度的变化规律称为风切变或风速轮廓线。风切变可以采用对数律分布或指数律分布来描述。

在离地面高度为 100 m 内的表面层中,风速轮廓线可以采用普朗特对数律分布来描述。对数律中考虑了地面粗糙度对风切变的影响,因此对数律分布为^[6]

$$V(z) = \left(\frac{u_*}{\kappa} \right) \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (1-1)$$

式中, $V(z)$ 为高度 z 处的平均风速; u_* 为摩擦速度; κ 为卡门(Karman)常数,一般取 0.4; z_0 为地面粗糙度,不同地面状态下的 z_0 值在表 1-1 中给出。

表 1-1 不同地面类型对应的地面粗糙度 z_0 ^[1,5]

地面类型	z_0 /m
平静的水面	0.000 1 ~ 0.001
开阔的耕地	0.03
乔木、灌木较少的草原、荒原	0.1
森林	0.3 ~ 1.6
建筑物较多的郊区	1.5
城市中心	2.0

如果已知地面粗糙度 z_0 ,把高度 z_1 和 z_2 分别代入式(1-1),则可得高度 z_2 处 V_2 的表达式:

$$V_2(z_2) = V_1(z_1) \frac{\ln(z_2/z_0)}{\ln(z_1/z_0)} \quad (1-2)$$

工程科学数据库(ESDU)给出了一个适合于离地高度 $z = 300$ m 内的风速轮廓线^[7]:

$$V(z) = \left(\frac{u_*}{\kappa}\right) \left[\ln \left(\frac{z}{z_0}\right) + 34.5fz/u_* \right] \quad (1-3)$$

式中, $f = 2\Omega \sin \phi$ (Ω 为地球自转角速度, $\Omega = 7.27 \times 10^{-5} \text{ rad/s}$, ϕ 为地理纬度), 一般情况下, 取 $f = 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ 。

指数分布律, 又称赫尔曼指数公式, 计算风切变时比较简单。赫尔曼的指数公式:

$$\frac{V_1(z_1)}{V_2(z_2)} = \left(\frac{z_1}{z_2}\right)^\alpha \quad (1-4)$$

式中, $V_1(z_1)$ 和 $V_2(z_2)$ 分别为高度 z_1 和 z_2 处的风速。风切变指数 α 的取值与高度 z 、地面粗糙度、大气层以及地貌有关^[4]。在我国建筑结构荷载规范中将地貌分为 A, B, C, D 四类, 每一类地貌都有对应的 α 的取值^[8]。因此, 测量得到的 α 值只适用于所测量的风场以及高度 z_1 和 z_2 , 不宜用于另外的高度。因此, 式(1-4)的应用受到局限。IEC 标准中认为 $\alpha = 0.2$ ^[9]。

1.2.2 平均风速分布

平均风速的分布可以用概率论中的概率密度函数及累计分布函数来表示。概率密度函数 $p(V)$ 可用于描述平均风速的概率分布; 累计分布函数 $P(V)$ 可用于描述平均风速的累计分布:

$$p(V) = \frac{dP(V)}{dV} \quad (1-5)$$

在风能工程领域, 一般采用 Weibull 分布函数来描述风频分布 $p(V)$ 。Weibull 分布函数的数学表达式为

$$P(V) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{V}{A} \right)^k \right] \quad (1-6)$$

Weibull 分布的概率密度函数可表示为

$$p(V) = \frac{k}{A} \left(\frac{V}{A} \right)^{k-1} \exp \left[- \left(\frac{V}{A} \right)^k \right] \quad (1-7)$$

式中, A 为尺度因子, 是平均风速 V 的度量; k 为形状因子, 用于描述分布曲线的形状, 代表不同的气候和地貌特征。如果风速相对均值波动小, 则 k 值较大; 若波动大, 则 k 值小。

平均风速 V 与 A 和 k 的关系可近似表达为

$$V \approx A \left(0.568 + \frac{0.434}{k} \right)^{1/k} \quad (1-8)$$

当 $k = 1.5 \sim 4.0$ 时, 式(1-8)近似为 $V \approx 0.9A$ 。

当风场规划时,了解风向分布很重要。根据风向分布布置风机的微观地址,可以使风机的尾流相互影响减小。风向分布可以用风向玫瑰图的形式来表达,在风向玫瑰图中,各方位的辐射线长度代表风向频度。风向玫瑰图也可以按不同的风速等级来绘制,一般将风速等级定为 $0 \sim 2 \text{ m/s}$, $2 \sim 4 \text{ m/s}$, $4 \sim 8 \text{ m/s}$ 和大于 8 m/s 四个区间。

1.3 脉动风速的特性

大气湍流脉动风速的发生机理可以分为动力学机理和热力学机理两大类。前者主要从大尺度剪切流中获取能量,后者则主要由热对流引起^[10],通常情况下,动力和热力同时起作用。大气边界层平均场的稳定性对于研究大气湍流的发生具有非常重要的意义。

1.3.1 湍流强度

一段时间 T 内的平均风速为

$$V = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) dt \quad (1-9)$$

其均方值(方差)为

$$\sigma^2 = \frac{1}{T} \int_0^T [v(t) - V]^2 dt \quad (1-10)$$

均方值是风速波动程度的度量。

湍流强度 I 定义为脉动风速均方根值与平均风速之比:

$$I = \frac{\sigma}{V} \quad (1-11)$$

式中, V 为平均风速,一般指 10 min (即 600 s) 的平均风速。由于不同平均时间的长度会影响湍流均方值,所以使用时要说明平均风速与均方值是由多长平均时间得到的。

一般将平均风速方向定义为风速的纵向分量,在水平面内与纵向分量垂直的分量称为横向;而将垂直方向的分量称为竖向。由定义可知,三个分量的湍流强度的定义分别为

$$I_u = \frac{\sigma_u}{V}, \quad I_v = \frac{\sigma_v}{V}, \quad I_w = \frac{\sigma_w}{V} \quad (1-12)$$

式中, u 为风速的纵向分量; v 为风速的横向分量; w 为风速的竖向分量。

在大气附面层的地表层中(离地面高度 $z \leq 100 \text{ m}$ 范围内),三个风速分量的

湍流均方根值是不同的。一般地,有 $\sigma_u > \sigma_v > \sigma_w$ 。在风工程中,重点研究的是纵向分量 σ_u ,其他两个分量的湍流方差以纵向分量 σ_u 的百分数形式给出。在参考文献[8-9]和参考文献[11-12]中,都给出了关于湍流强度的计算公式。当使用这些公式时,要注意其使用范围。

湍流方差及湍流强度的概念在风场模拟和载荷计算时极为重要,它们是模拟脉动风场的关键参数。国际标准 IEC 61400-1 针对不同的风力机设计要求,给出了不同的计算方法。

1.3.2 湍流相关性

在本小节中,将湍流统计学中的基本理论用于脉动风速的分析中,介绍时间相关函数、空间相关函数和相干函数在描述脉动风速中的具体应用。

1. 时间相关函数与各态历经定律

时间相关函数是具有零均值的随机变量脉动项 x 在 t 时刻和 $t+\tau$ 时刻乘积的平均值作为延迟时间 τ 的函数。它是脉动项 $x(t)$ 与延迟后 $x(t+\tau)$ 之间相似性的度量,表示为

$$R_{xx}(t, t+\tau) = E(x(t)x(t+\tau)) \quad (1-13)$$

自相关系数可以用于描述随机变量相关性的程度,其表达式为

$$\rho_{xx}(\tau) = \frac{E(x(t)x(t+\tau))}{\sigma_x^2} \quad (1-14)$$

互相关函数是指具有零均值的两个随机变量 x 及 z 在 t 时刻和 $t+\tau$ 时刻乘积的平均值作为延迟时间 τ 的函数。它是随机量 $x(t)$ 与延迟后的随机量 $z(t+\tau)$ 之间相似性的度量,表示为

$$R_{xz}(t, t+\tau) = E(x(t)z(t+\tau)) \quad (1-15)$$

互相关系数定义为

$$\rho_{xz}(t, t+\tau) = \frac{E(x(t)z(t+\tau))}{\sigma_x \sigma_z} \quad (1-16)$$

以风速脉动分量为例,在构造分量 u 与 w 的互相关函数 $E(u(t)w(t+\tau))$ 后,可得到互相关系数为

$$\rho_{uw}(\tau) = \frac{E(u(t)w(t+\tau))}{\sigma_u \sigma_w} \quad (1-17)$$

互相关系数 ρ_{uw} 的绝对值越小,表示这两个时刻上随机变量 u 与 w 在统计学上的联系越小;反之,则表示在统计学上的联系越紧密。

一般情况下,假设脉动风速是平稳过程,即有下式成立:

$$R_{uw}(t, t+\tau) = R_{uw}(\tau) \quad (1-18)$$