



“十二五”“十三五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

增速型风力发电 机组结构设计技术

ZENG SUXING FENGLI FADIAN
JIZU JIEGOU SHEJI JISHU

马铁强 王士荣 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十三五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程技术丛书

增速型风力发电 机组结构设计技术

马铁强 王士荣 编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

·北京·

内 容 提 要

本书是《风力发电工程技术丛书》之一,细致地阐述了增速型风力发电机组的结构特点、总体设计流程与设计方法、部件结构设计与选型等方面内容。本书共7章,主要包括绪论、风力发电机组结构设计、风轮结构规划与设计、主轴子系统结构规划与设计、增速齿轮箱结构规划与设计、液压与制动系统规划与设计、支撑结构规划与设计等内容。本书引用了大量实际工程案例,融汇了作者多年积累的工程设计经验和理论研究成果,具有鲜明的理论与实践相结合的特点。

本书可供高等院校相关专业师生及风电企业的高级工程技术人员学习和阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

增速型风力发电机组结构设计技术 / 马铁强, 王士荣编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2017.2
(风力发电工程技术丛书)
ISBN 978-7-5170-5217-3

I. ①增… II. ①马… ②王… III. ①风力发电机—发电机组—结构设计 IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第046035号

书 名	风力发电工程技术丛书 增速型风力发电机组结构设计技术 ZENG SUXING FENGLI FADIAN JIZU JIEGOU SHEJI JISHU
作 者	马铁强 王士荣 编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 68367658 (营销中心)
经 售	北京科水图书销售中心(零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	中国水利水电出版社微机排版中心
印 刷	三河市鑫金马印装有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 9.25印张 220千字
版 次	2017年2月第1版 2017年2月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	50.00元



凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

《风力发电工程技术丛书》

编 委 会

顾 问 陆佑楣 张基尧 李菊根 晏志勇 周厚贵 施鹏飞

主 任 徐 辉 毕亚雄

副 主 任 汤鑫华 陈星莺 李 靖 陆忠民 吴关叶 李富红

委 员 (按姓氏笔画排序)

马宏忠 王丰绪 王永虎 申宽育 冯树荣 刘 丰

刘 玮 刘志明 刘作辉 齐志诚 孙 强 孙志禹

李 炜 李 莉 李同春 李承志 李健英 李睿元

杨建设 吴敬凯 张云杰 张燎军 陈 刚 陈 澜

陈党慧 林毅峰 易跃春 周建平 郑 源 赵生校

赵显忠 胡立伟 胡昌支 俞华锋 施 蓓 洪树蒙

祝立群 袁 越 黄春芳 崔新维 彭丹霖 董德兰

游赞培 蔡 新 糜又晚

丛 书 主 编 郑 源 张燎军

丛 书 总 策 划 李 莉

主要参编单位 (排名不分先后)

河海大学

中国长江三峡集团公司

中国水利水电出版社

水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心

水电水利规划设计总院

水利部水利水电规划设计总院

中国能源建设集团有限公司

上海勘测设计研究院有限公司

中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司

中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司

中国电建集团中南勘测设计研究院有限公司

中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司

中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司

中国电建集团成都勘测设计研究院有限公司

长江勘测规划设计研究院

中水珠江规划勘测设计有限公司

内蒙古电力勘测设计院

新疆金风科技股份有限公司

华锐风电科技股份有限公司

中国水利水电第七工程局有限公司

中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司

中国能源建设集团安徽省电力设计院有限公司

华北电力大学

同济大学

华南理工大学

中国三峡新能源有限公司

华东海上风电省级高新技术企业研究开发中心

浙江运达风电股份有限公司



前 言

随着世界人口不断增长和工业经济的日趋繁荣，人类社会对能源的需求总量持续攀升，导致化石能源等一次能源消耗殆尽。传统能源格局的不合理，在能源供应紧张中逐步凸显。为了优化能源产业结构，世界各国正寻求风能、太阳能、生物质能、核能、潮汐能、地热能、空气热能等新型的可再生能源，并在过去 30 年间获得了飞速进展。目前，风能已成为我国第三大能源形式，风电装机容量和并网发电容量仍在以较高的速度持续增长。

我国在 20 世纪 70 年代就开始了风能领域的技术探索和研究。直到 21 世纪初，随着世界能源形势的日趋紧张，我国开始逐步加大风能领域的技术攻关和产业推广力度，并已取得了长足进展，至今已陆续涌现出一批优秀的风电企业和科研院所，还有更多的企业、高校和科研机构不断地投身于风能产业。

作者自 2009 年以来，一直工作在风电行业第一线，从事风电领域的科研、教学和新产品研发工作，因此在本书中汇集了风电领域的多项产品研发经验成果、最新研究技术和教学实践经验。本书内容聚焦于增速型风力发电机组机械结构的规划、设计和选型方法。增速型风力发电机组是水平轴风力发电机组的主流结构，广泛应用于双馈式、半直驱等机型的风力发电机组中。本书对高等院校相关专业的本科生、研究生及风电企业的高级工程技术人员学习和研究风力发电机组结构设计的相关技术有一定的参考价值。

本书共分 7 章，其中马铁强撰写了大部分书稿内容，王士荣为全书整理和编排了大量具有重要实践价值的工程案例，孙德滨、苏阳阳等研究生协助校对了对全书的文字、图片、模型、数据、表格和公式等内容。此外，刘颖明、王允生、张森林、孙传宗也参与编写了书中部分内容，为本书出版提出了建议。

本书还得到了沈阳工业大学姚兴佳教授的支持，姚教授对本书的撰写和出版提出了许多宝贵的建议，在此一并表示衷心感谢。

本书编写水平有限，疏漏之处在所难免，恳请读者给予批评指正。

作者

2017年2月



目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 风力发电机组机械结构概述	1
1.2 风力发电机组的传动结构分类	2
1.2.1 增速型风力发电机组结构及特点	2
1.2.2 直驱型风力发电机组结构及特点	3
1.2.3 增速型与直驱型风力发电机组技术对比	3
1.3 增速型风力发电机组结构设计	4
1.3.1 风力发电机组多学科协同设计方法	4
1.3.2 风力发电机组一体化建模方法	5
第 2 章 风力发电机组结构设计	6
2.1 风力发电机组设计影响因素和载荷	6
2.1.1 风力发电机组设计考虑的环境条件	6
2.1.2 风力发电机组设计载荷及其来源	8
2.1.3 由环境条件确定整机安全等级	9
2.2 风力发电机组的设计过程和方法	10
2.2.1 风力发电机组功能规划	10
2.2.2 总体参数设计	12
2.2.3 结构方案设计	15
2.2.4 部件选型	17
2.3 风力发电机组可靠性设计与校核方法	18
2.3.1 可靠性设计	19
2.3.2 风力发电机组可靠性设计方法	20
2.3.3 风力发电机组可靠性校核内容	23
第 3 章 风轮结构规划与设计	25
3.1 风轮设计	25

3.1.1	风轮结构	25
3.1.2	风轮参数	26
3.1.3	风轮载荷分析	29
3.1.4	风轮设计流程	30
3.2	叶片结构与选型	31
3.2.1	设计和选型要求	31
3.2.2	原理和结构	31
3.2.3	叶片选型	33
3.3	变桨距机构设计	36
3.3.1	变桨距机构概述	36
3.3.2	变桨距机构规划	37
3.3.3	变桨距轴承选型与设计	41
3.3.4	变桨距机构设计	45
3.4	轮毂设计	48
3.4.1	轮毂设计概述	48
3.4.2	轮毂结构设计	50
第4章	主轴子系统结构规划与设计	52
4.1	主轴子系统结构设计	52
4.1.1	主轴子系统结构概述	52
4.1.2	主轴系统结构方案规划	52
4.2	主轴结构规划与设计	54
4.2.1	主轴设计规划	54
4.2.2	主轴直径估算	56
4.2.3	主轴法兰设计和估算	58
4.3	主轴承设计与选型	58
4.3.1	主轴承选型流程	58
4.3.2	轴承选型方案	59
4.3.3	主轴承载荷分析	59
4.3.4	主轴承寿命计算	60
4.3.5	主轴承的润滑与密封	61
第5章	增速齿轮箱结构规划与设计	63
5.1	齿轮箱设计概述	63
5.1.1	齿轮箱的设计目标	63
5.1.2	齿轮箱的设计条件	64
5.1.3	齿轮箱的设计步骤	66
5.2	齿轮箱传动方案设计	66
5.2.1	典型轮系方案	66

5.2.2	轮系方案优化方法	67
5.2.3	轮系布局设计原则	68
5.2.4	传动比分配原则	68
5.3	齿轮的设计和计算方法	69
5.3.1	轮齿齿形设计	69
5.3.2	轮齿参数计算	69
5.3.3	齿轮啮合计算	71
5.3.4	轮齿变位计算	71
5.3.5	齿轮修形方法	74
5.3.6	齿轮精度设计	76
5.3.7	齿轮材料	77
5.4	齿轮箱结构	77
5.4.1	箱体结构	77
5.4.2	行星架结构	78
5.4.3	齿轮轴结构	79
5.4.4	轴承选型	80
5.5	润滑与温控	81
5.6	性能评估	82
5.6.1	承载性能评估	82
5.6.2	传动性能评估	82
第6章	液压与制动系统规划与设计	84
6.1	液压系统功能规划	84
6.1.1	变桨距驱动功能规划	84
6.1.2	偏航阻尼与制动功能规划	85
6.1.3	传动系统制动功能规划	86
6.2	液压系统结构原理	86
6.2.1	液压系统结构概述	86
6.2.2	风电液压系统结构与原理	87
6.2.3	风电液压系统案例解析	89
6.3	液压系统设计方法	91
6.3.1	设计要求及工况分析	91
6.3.2	液压系统参数设计	94
6.3.3	拟定液压系统原理图	95
6.3.4	计算和选择液压件	97
6.3.5	液压系统性能校验	99
6.4	制动装置选型与设计	101
6.4.1	制动装置结构和原理	101

6.4.2 制动器选型与设计	102
第7章 支撑结构规划与设计	105
7.1 机舱传动链支撑结构设计	105
7.1.1 主机架功能规划	105
7.1.2 主机架结构特点	107
7.1.3 主机架结构	108
7.1.4 主机架设计步骤	110
7.2 偏航与回转支撑结构设计	111
7.2.1 偏航功能规划	111
7.2.2 偏航机构组成	112
7.2.3 偏航机构设计	114
7.3 塔架支撑结构设计	120
7.3.1 塔架功能规划	120
7.3.2 典型塔架结构	122
7.3.3 锥筒式塔架结构设计	123
参考文献	136

第 1 章 绪 论

自 20 世纪初世界上第一台风力发电机组问世以来, 风力发电技术经历了近百年的发展历程, 其中相当长的时期内, 仅仅被作为一种解决局部地区或个别家庭用电的小型发电装置, 技术发展相对缓慢。

从 20 世纪 70 年代开始, 全球性能源危机逐步显现, 传统化石能源的大量消耗不仅将人类世界拉到了能源枯竭的危险边缘, 化石能源消费所形成的环境污染也日益困扰着全球。人们转而将视野投向风能、太阳能、生物质能以及核能等新型可再生能源。自此风力发电开始被人们所熟知, 受到世界各国重视, 逐渐成长为一种主要的能源形式。

到 21 世纪初, 风力发电产业呈现出爆炸式的迅猛发展态势, 全球装机容量和风电场数量连年大幅增长。随着人类大规模开发利用风能的需求不断增长, 传统的以局部地区应用为主的中小型风力发电设备已经难以满足发展要求, 较大装机容量的风力发电机组逐渐成为全球企业竞相发展的关键能源装备。

目前, 国际主流风力发电机组单机装机容量通常超过 1MW, 已成为解决大规模风电并网问题的关键设备, 是风电行业重要基础型设备。截至 2015 年年底, 全球风电总装机容量已经达到了 432419MW, 新增装机容量达到 63013MW, 并且随着生产规模的不断扩大, 风力发电机组在改善全球能源结构方面所发挥的作用逐步凸显。

1.1 风力发电机组机械结构概述

风力发电机组是一种涉及机械、电气、控制、空气动力学等多学科的复杂装备, 由机械系统、电气系统、控制系统等不同系统构成, 各系统之间既彼此独立又相互联系。实际工程中, 风力发电机组机械结构设计往往被视为独立的工作内容。

风力发电机组包括风轮、机舱和塔架等结构, 其中风轮由叶片和轮毂组成。叶片以一定的空气动力外形在气流作用下产生风轮旋转驱动力矩, 并通过轮毂将力矩输入到传动系统。机舱由底盘、机舱罩及传动系统等结构构成, 底盘上安装除主控制器以外的主要部件。机舱罩上面装有风速和风向传感器, 舱壁上有隔音和通风装置等, 底部与塔架连接。塔架支撑机舱达到特定风能捕获效果所需的高度, 安置了发电机和主控制器之间的动力、控制和通信电缆, 还装有供操作人员上下机舱的爬梯, 一些超大型风力发电机组还设有升降梯。整个塔架安装于钢筋混凝土基础上, 基础结构根据机位处的水文、地质状况而定。图 1-1 为风力发电机组机械结构构成图。

风力发电机组机舱内主要结构如图 1-2 所示, 包括轮毂与变桨距结构、主传动系统结构、传动链支撑结构、偏航与回转支承结构、塔架结构、液压与制动系统等。

(1) 轮毂与变桨距结构。由叶片、变桨距机构、轮毂及辅助组件和零件构成, 变桨距机

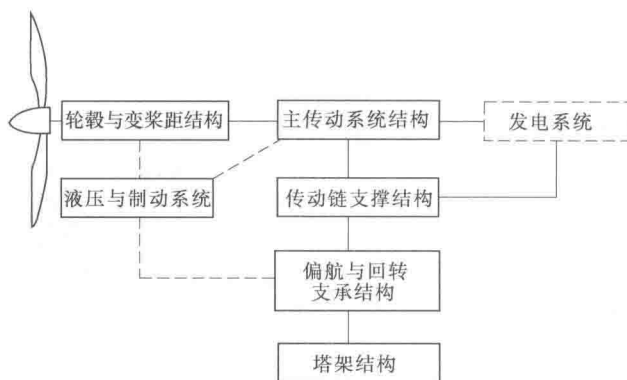


图 1-1 风力发电机组机械结构构成图

构负责链接叶片和轮毂，并控制叶片相对轮毂的位置和运动关系。

(2) 主传动系统结构。风轮轴到发电机输入端的机械传动装置，包括主轴及其支撑结构、增速传动装置、发电机、联轴器等部件。

(3) 传动链支撑结构。用于支撑和固定主传动系统及其辅助的机电液控制装置，其结构是根据主传动系统的结构适应性定制开发。

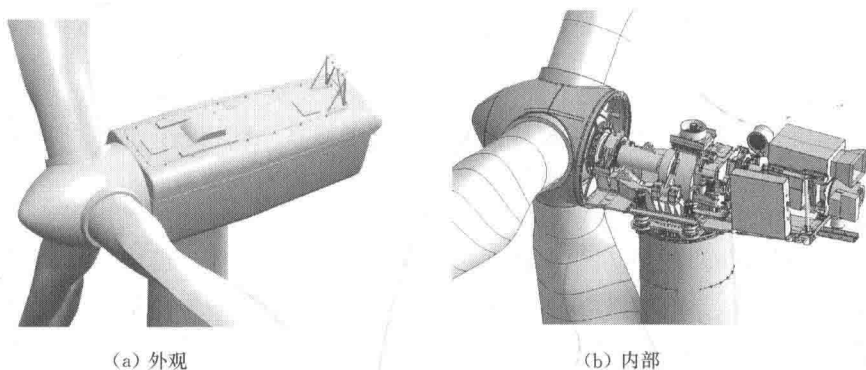


图 1-2 风力发电机组结构

(4) 偏航与回转支承结构。由回转轴承、偏航驱动装置及辅助机电液控制装置构成，将机舱与塔架连接起来，并控制机舱相对塔架做回转运动。

(5) 塔架结构。用于支撑风力发电机组的机舱、风轮等工作部件，承受由回转支承传递而来的各种载荷。

(6) 液压与制动系统。液压系统为主传动系统、偏航机构提供制动力和力矩，为变桨距机构提供动力的液压机械装置，包括液压站、输油管、液压执行机构等。

为了保证各子系统的协调可靠运行，风力发电机组还配有各种传感器，以监测风力发电机组的温度、油位、转速、振动等运行状态，控制系统根据测得的状态值进行适应性调节。

1.2 风力发电机组的传动结构分类

风力发电机组有很多种不同的分类方法，可根据传动系统结构、风轮轴朝向、单机发电容量、叶片变桨距驱动形式、发电机转速范围等进行分类。

1.2.1 增速型风力发电机组结构及特点

增速型风力发电机组是主传动系统中应用了齿轮箱等增速传动机构的风力发电机组。



该类风力发电机组通过增速传动机构将风轮在风力作用下产生的转矩和转速，转换为发电机正常运行所需的转速和转矩。该类风力发电机组通过增速传动机构将风轮与发电机隔离，使发电机运行更平稳；发电机得到有效保护；增速传动机构的使用，使发电机转子可以运行在较高的转速，有效减少发电机的极对数，使发电机体积更小、成本更低。但是增速传动机构的使用，也增加了风力发电机组的总成本。

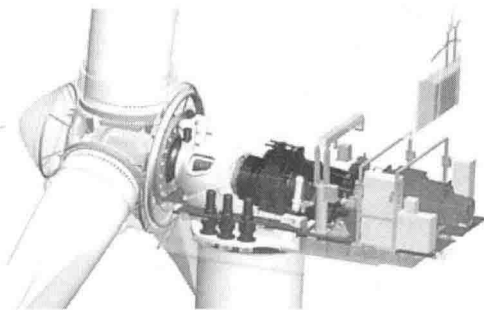


图 1-3 增速型风力发电机组结构示例

图 1-3 为沈阳工业大学风能技术研究所设计的 3MW 风力发电机组，该风力发电机组采用了增速型风力发电机组结构。

1.2.2 直驱型风力发电机组结构及特点

直驱型风力发电机组是由风轮轴直接拖动发电机转子在较低转速下运行的风力发电机组。

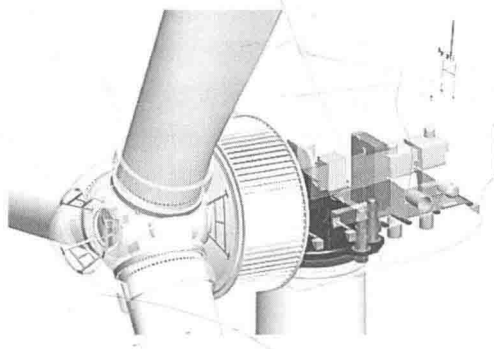


图 1-4 直驱型风力发电机组结构示例

该类风力发电机组结构省去了增速齿轮箱，减少了传动损耗，提高了发电效率。由于增速传动机构是风力发电机组中故障频率较高的部件。如果风力发电机组中省去了齿轮箱及其附件，那么传动结构得以简化，风力发电机组在低转速下运行，可靠性会更高。此外，省去了增速传动机构可减少风力发电机组零部件数量，节省了更换齿轮箱油的成本。图 1-4 为某型号的 2MW 风力发电机组，该风力发电机组即采用了风轮直驱型风力发电机组结构。

鉴于带增速传动机构的风力发电机组结构复杂，而且技术发展成熟，总装机容量占国内总装机容量的绝大多数，因此本书以此类风力发电机组为例，阐述风力发电机组结构的设计方法。

1.2.3 增速型与直驱型风力发电机组技术对比

1. 优点

目前，约 60% 以上风力发电机组是采用带增速传动机构的风力发电机组。增速型风力发电机组可以是高传动比的双馈式风力发电机组，也可以是中传动比结构的永磁同步风力发电机组，即俗称的混合式风力发电机组。这使得增速型风力发电机组的被选方案更多。其中，采用中传动比的永磁同步风力发电机组，转子转速较高，发电机体积更小，结构更为紧凑，永磁材料的用量更少，可降低整机成本。采用增速传动机构将风轮转速提升到较高范围，可有效地提高发电机效率。

2. 缺点

增速型风力发电机组的主流机型为双馈式风力发电机组。该机型在亚同步速状态时运行,需要从电网吸收少量能量供转子励磁。增速型风力发电机组中的齿轮箱,增加了传动链的长度,使机组故障率大大增加。从机械结构考虑,齿轮箱使传动链的摩擦和磨损增多,机械效率将有所降低。此外,齿轮箱是风力发电机组中故障率最高的部件,会增加风电场的维修、定检和保养方面的费用。

但无论怎样,增速型风力发电机组是风力发电机组设计和技术发展的主流和趋势。

1.3 增速型风力发电机组结构设计

基于增速型风力发电机组的诸多优点,该类风力发电机组目前已成为国际上发展最成熟、应用最广泛的机型。

1.3.1 风力发电机组多学科协同设计方法

风力发电机组设计制造过程包括概念设计、初步设计、详细设计、工厂总装、吊装调试、运行测试等阶段。根据风力发电机组设计过程及各阶段设计内容,结合风力发电机组制造企业在气动载荷计算、机组设计与建模、结构分析和控制仿真等业务环节的实际情况,本书提出了风力发电机组多学科协同设计方法,具体流程如图1-5所示。

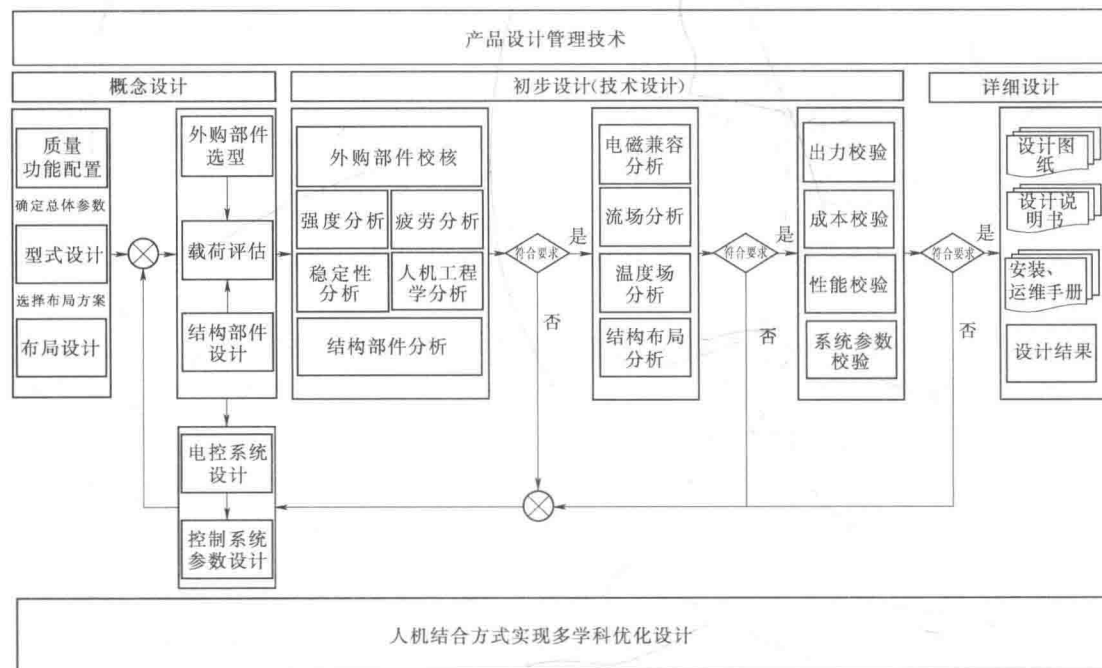


图 1-5 风力发电机组多学科协同设计

该流程将风力发电机组设计工作分为三个主要环节,即概念设计、初步设计和详细设计。



概念设计阶段通过质量功能配置,将用户对机组的需求转化为机组性能参数;然后从双馈式、直驱式、半直驱式等机型中选择具体型式,完成风力发电机组的总体型式设计,再确定传动系统的构成及布局方案。

初步设计阶段分为四个环节,即选型与设计、结构性能分析、结构布局分析和系统参数校验等环节。对各个环节而言,若分析结果不符合设计要求,将校验结论向选型和设计环节反馈,三个环节共有三次反馈,反馈环节相互交错,使初步设计阶段实现闭环目标。

在初步设计合格之后,详细绘制风力发电机组的设计图纸、设计说明书及安装和运维手册。

风力发电机组多学科协同设计流程使风力发电机组在满足结构和部件的力学性能要求、总体布局合理性要求及总体经济性要求的条件下,使风力发电机组结构更为优化、设计周期更短。该流程将机械系统和电气系统的选型和设计工作并行开展,能够缩短一定的工期。

1.3.2 风力发电机组一体化建模方法

现代风电企业大多采用数字化设计方法设计和开发风力发电机组,用软件设计机组可以有效提高效率。本书提出风力发电机组一体化建模方法,即以多学科协同设计流程为基础,利用现代化的产品设计管理技术实现设计流程中各个业务环节的数据集成,用人机结合的方法对各个业务环节的风力发电机组设计任务进行解耦,对结果进行优化。图 1-6 为该方法的示意图。

风力发电机组一体化设计方案包括模型和参数两个层面,分别向仿真分析、结构力学分析、布局分析、经济性分析等环节做投影视图,形成针对不同环节的模型和数据视图。风力发电机组一体化建模方案从风力发电机组及其部件的选型设计开始,并以设计选型产生的参数和模型为核心,根据不同转换规则进行映射。风力发电机组一体化建模方案的采用,使大功率风力发电机组设计、分析及优化过程在数据层实现了集成。

由于集成的模型和参数具有高相关性,造成各个环节任务强耦合,因此普通优化方法难以快速形成收敛的优化解决方案,可用人机结合的方法予以寻优。产品设计管理工具可在网络上实现多工位、多环节、多部门即时互联互通,是实现人工干预和约束下的风力发电机组多目标优化的有力工具。

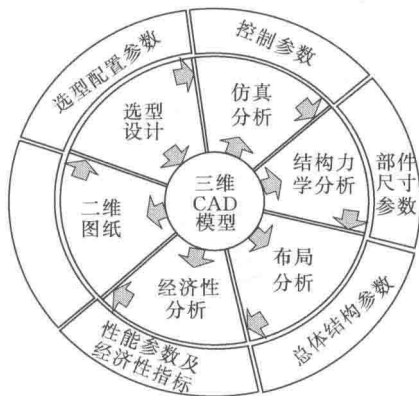


图 1-6 风力发电机组多学科一体化建模

第 2 章 风力发电机组结构设计

风力发电机组结构设计与其他机械产品的设计方法略有不同, 需要考虑风电场的地理、气候和环境要素, 同时依照或参考标准规定的通行技术要求。

2.1 风力发电机组设计影响因素和载荷

风力发电机组是在随机瞬变风载荷下实现风电能量转换的高耸发电系统, 风轮直径和塔高达到百米量级, 工作环境复杂恶劣, 且需要无人值守、全天候运行。风力发电机组设计、制造及工程应用, 需要综合考虑气动、机械、电气、控制、海洋地质等多学科因素。为了保证风力发电机组在 20 年寿命期内安全可靠运行, 必须掌握风力发电机组的运行环境和设计影响因素。

2.1.1 风力发电机组设计考虑的环境条件

风力发电机组设计中需要考虑诸多因素, 包括图 2-1 所示的风况、海况及其他因素。最主要的因素是风况, 用于校核机组设计方案的可靠性, 验证风力发电机组的控制参数。

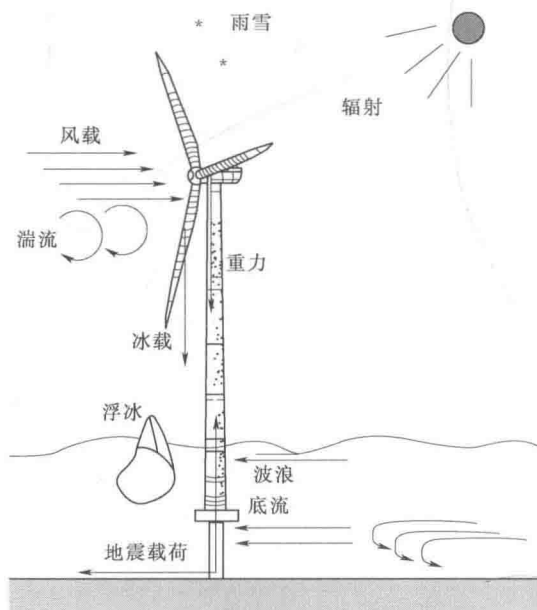


图 2-1 风力发电机组设计考虑的复杂环境条件

2.1.1.1 风况条件

1. 风况及其分类

从载荷和安全考虑, 设计风况分为正常风况和极端风况两类。正常风况是指风轮正常运行期间频繁出现的风况; 极端风况是指 1 年一遇或 50 年一遇的极限风况。风可以分解为稳定的平均气流和变化的阵风或湍流, 并要考虑平均气流和水平面夹角达到 8° 时的影响。湍流是指风速矢量相对于 10min 平均值的随机变化, 是由纵向、横向和竖向三个方向分量共同构成的矢量。风电场测风数据有随机性, 且风况十分复杂, IEC 标准规定了一些标准的风况模型, 以简化风力发电机组的计算与校核过程。

2. IEC 规定的风况模型

正常风况由正常的风速分布模型、正常风廓线模型和正常湍流模型来描述, 表现正常情况下风在时空中的分布情况及波动