



沈阳市优秀自然科学著作

风力机传动系统 流固热耦合及可靠性研究

关 新◎著



辽宁科学技术出版社

LIAONING SCIENCE AND TECHNOLOGY PUBLISHING HOUSE

沈阳市优秀自然科学著作

风力机传动系统 流固热耦合及可靠性研究

关新 著

辽宁科学技术出版社

沈 阳

© 2018 关 新

图书在版编目 (CIP) 数据

风力机传动系统流固热耦合及可靠性研究/关新著. —
沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2018. 11
(沈阳市优秀自然科学著作)
ISBN 978-7-5591-0712-1

I. ①风… II. ①关… III. ①风力机械—传动系
—研究 IV. ①TK83

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 076546 号

出版发行: 辽宁科学技术出版社

(地址: 沈阳市和平区十一纬路 25 号 邮编: 110003)

印刷者: 辽宁鼎籍数码科技有限公司

幅面尺寸: 185 mm×260 mm

印 张: 15

字 数: 390 千字

出版时间: 2018 年 11 月第 1 版

印刷时间: 2018 年 11 月第 1 次印刷

责任编辑: 郑 红

特邀编辑: 王奉安

封面设计: 嵘 嵘

版式设计: 周龙骧

责任校对: 栗 勇

书 号: ISBN 978-7-5591-0712-1

定 价: 48.00 元

联系电话: 024-23284526

邮购热线: 024-23284502

<http://www.lnkj.com.cn>

前 言

风力机工作环境恶劣，常年经受无规律的变向变负荷的风力作用及强阵风的冲击，同时，设备在运行过程中，为保证叶轮获得更多的风能，需要经常变桨、偏航，这将使风力机在运行过程中受到附加载荷的作用。加之高空架设、维修困难等原因，要求其运行可靠性和工作寿命比一般机械系统高得多。作为风力机的主要机械设备，传动系统需要承受更高不稳定的随机动载荷和更高的疲劳应力，这将导致风力机传动系统故障频发，严重影响风力机运行安全。因此，研究风力机传动系统的动力学行为和振动特性对提高风力机的稳定运行有重要的现实意义。

齿轮箱作为风力机传动系统的重要传动部件，其工作性能及可靠性对于整个风力机的传递性能、使用性能和经济性能影响重大，由于长期在高速、重载的条件下工作，因此必须同时满足高可靠性、耐高温、轻量化等要求。传统对传动系统中齿轮的研究主要表现在热分析、振动分析、可靠性分析等某一方面，而在实际工况中齿轮是受多种条件共同耦合作用影响；传统对由齿轮、轴、轴承组成的轴系系统的研究并没有考虑到装配误差、径向游隙和可靠性等因素。因此，将可靠性理论引入传动系统齿轮箱轮系的耦合分析和轴系结构整体的动静力学分析中，对提高风力机齿轮箱的工作性能、可靠性意义重大。

本书基于空气动力学、流体力学、虚拟试验技术、流固耦合理论、齿轮啮合原理、摩擦学、热弹耦合理论、随机参数振动及非线性接触算法等，综合采用理论分析方法、实验测量分析方法和有限元分析方法，研究了风力机运行环境下气动载荷、运行载荷对传动系统中低速轴、齿轮箱、高速轴、联轴器和发电机的影响，及在气动载荷和运行载荷耦合作用下传动系统整体特性、动静力学、齿轮的热变形引起的非渐开线误差、温度对齿轮模态的影响、热弹耦合齿轮的接触特性、轴系的动静力学和若干相关可靠性灵敏度问题。通过以上研究，较全面地掌握了风力机运行环境下所承受载荷的工程计算方法及各类载荷对风力机整体及部件振动的影响规律，为风电场工程设计和风力机可靠性设计及优化设计奠定基础。

作者

2017年7月

目 录

1 绪论	001
1.1 课题背景及课题来源	001
1.1.1 课题背景	001
1.1.2 研究意义及目的	003
1.1.3 课题来源	004
1.2 风力机传动系统	004
1.2.1 传动系统概述	004
1.2.2 研究现状	006
1.3 相关领域研究现状	007
1.3.1 风力机气动载荷研究	007
1.3.2 传动系统的振动特性研究	010
1.3.3 虚拟实验技术研究现状	012
1.3.4 流固耦合分析研究现状	013
1.3.5 机械可靠性灵敏度研究现状	014
1.3.6 耦合热分析的研究现状	015
1.4 本书的主要研究工作	019
2 风力机空气动力载荷工程计算	022
2.1 概述	022
2.1.1 风力机载荷	022
2.1.2 坐标系	023
2.1.3 坐标系的转换	024
2.2 Weibull 风速分布数学模型	025
2.3 空气动力载荷	029
2.3.1 时变气动载荷	029
2.3.2 湍流载荷	031
2.3.3 尾流互扰载荷	034

2.3.4	空气密度变化引起的载荷变化·····	036
2.4	其他载荷·····	037
2.4.1	惯性载荷·····	037
2.4.2	重力载荷·····	037
2.4.3	冰载荷·····	037
2.4.4	地震载荷·····	038
2.5	风力机运行载荷·····	039
2.5.1	风切变对风力机载荷影响·····	039
2.5.2	机械制动载荷·····	039
2.5.3	塔影效应·····	040
2.6	风力机流固耦合理论分析·····	040
2.6.1	流体控制方程·····	041
2.6.2	固体控制方程·····	042
2.6.3	流固耦合方程·····	042
2.7	计算实例·····	043
2.7.1	风力机工程简化·····	043
2.7.2	计算结果·····	044
2.8	小结·····	046
3	稳定气流作用下风力机传动系统振动及动力学分析·····	047
3.1	概述·····	047
3.2	传动系统虚拟样机的建立·····	047
3.3	具有运动自由度的传动系统模态分析·····	050
3.3.1	单自由度体系的振动·····	050
3.3.2	随机振动分析·····	051
3.3.3	多自由度体系的线性反映分析·····	051
3.3.4	计算实例·····	052
3.4	传动系统谐响应分析·····	054
3.4.1	计算方法·····	054
3.4.2	计算实例·····	055
3.5	传动系统谱分析·····	056
3.5.1	随机振动方法·····	056
3.5.2	气动载荷随机振动分析·····	057
3.5.3	平稳随机过程的谱参数·····	058
3.5.4	随机连续体的固有值分析·····	059
3.5.5	功率谱密度响应和均方根响应·····	060
3.5.6	计算实例·····	061

3.6	瞬态动力学分析	062
3.6.1	冲击动态响应分析一般方法	062
3.6.2	传动系统冲击动态响应有限元分析	065
3.6.3	计算实例	067
3.7	接触分析	068
3.7.1	接触算法	069
3.7.2	接触摩擦模型	069
3.7.3	计算实例	070
3.8	小结	072
4	考虑结构特征下风力机传动系统振动特性研究	073
4.1	概述	073
4.2	传动系统固有特征	073
4.2.1	分析方法及流程	075
4.2.2	传动系统有限元模型	075
4.3	传动系统模态及机械敏感度分析	077
4.3.1	传动系统模态及固有频率	077
4.3.2	固有频率对传动系统参数的敏感度	080
4.4	传动系统结构振动特性实验分析	082
4.4.1	传动系统数据采集平台	082
4.4.2	运行参数对传动系统振动特性的影响	085
4.4.3	传动系统的动态激励分析	091
4.5	小结	095
5	综合载荷作用下传动系统振动特性及机械可靠性灵敏度分析	097
5.1	概述	097
5.2	风力机传动系统静力学分析	097
5.3	风力机传动系统动力特性分析	100
5.3.1	分析流程	100
5.3.2	风力机模型的建立	101
5.3.3	气动载荷的作用过程	102
5.3.4	轮毂—主轴—主轴轴承传动系统瞬态动力学分析	104
5.3.5	考虑运行载荷下齿轮箱—高速轴—发电机传动系统 振动谱分析	107
5.4	传动系统机械可靠性灵敏度分析	108
5.4.1	分析方法	108
5.4.2	传动系统机械可靠性模型	111
5.4.3	考虑运行载荷作用下风力机传动系统动态可靠性分析	112

5.5 小结	119
6 基于热变形的齿轮副非渐开线误差分析	120
6.1 概述	120
6.2 齿轮热变形基本理论	120
6.3 齿轮副虚拟样机的建立	122
6.3.1 齿廓曲线的参数方程	122
6.3.2 全齿实体模型的建立	124
6.4 齿轮稳态温度场有限元分析	125
6.4.1 导热微分方程和定解条件的确定	125
6.4.2 齿轮各边界条件的确定	126
6.4.3 热载荷的确定	127
6.5 齿轮瞬态温度场有限元分析	132
6.5.1 导热微分方程和定解条件的确定	132
6.5.2 齿轮瞬态热分析的有限元方法	133
6.5.3 边界条件的加载	134
6.6 齿轮热—结构耦合有限元分析	135
6.7 热变形引起的非渐开线误差计算	137
6.8 计算实例	138
6.8.1 齿轮副有限元模型的建立	138
6.8.2 齿轮副热—结构耦合的有限元分析	140
6.8.3 齿轮副热变形的计算	142
6.9 小结	143
7 基于热分析的齿轮模态及共振可靠性灵敏度分析	144
7.1 概述	144
7.2 温度影响模态的基本理论	144
7.2.1 模态分析理论	144
7.2.2 温度对结构模态的影响机制	146
7.2.3 热应力的理论基础	146
7.3 考虑温度场的齿轮模态分析	147
7.3.1 分析方法及流程	147
7.3.2 求解齿轮热应力	149
7.3.3 ANSYS 的模态分析	149
7.4 齿轮共振可靠性及灵敏度分析方法	150
7.4.1 齿轮共振失效分析	150
7.4.2 Monte Carlo 模拟法	150
7.4.3 ANSYS 概率有限元法	151

7.5	计算实例	153
7.5.1	齿轮轴有限元模型的建立	153
7.5.2	求解齿轮轴热应力	153
7.5.3	考虑温度场的齿轮轴模态分析	154
7.5.4	基于热分析的齿轮振动可靠性及灵敏度分析	159
7.6	小结	162
8	齿轮热弹耦合特性分析	164
8.1	概述	164
8.2	热弹耦合接触有限元法	164
8.2.1	接触传热迭代过程	164
8.2.2	弹性接触迭代过程	165
8.2.3	耦合迭代求解	166
8.3	基于 ANSYS 求解热弹性耦合分析	166
8.3.1	热弹耦合结构分析接触类型的确定	166
8.3.2	热弹耦合结构分析接触算法的确定	167
8.3.3	热弹耦合有限元模型的建立	168
8.3.4	热弹耦合接触分析流程图	168
8.4	响应面-Monte Carlo 可靠性灵敏度分析方法	170
8.4.1	响应面法	170
8.4.2	建立齿面接触强度的极限状态函数	172
8.4.3	Monte Carlo 可靠性灵敏度分析	172
8.5	计算实例	173
8.5.1	热弹耦合接触应力的提取	173
8.5.2	响应面法拟合极限状态函数	174
8.5.3	极限状态函数的 Monte Carlo 可靠性灵敏度分析	175
8.6	小结	177
9	考虑装配误差的轴系结构静力学及灵敏度分析	178
9.1	概述	178
9.2	求解接触问题的有限元法	179
9.3	基于 Pro/E 的轴系结构模型的建立	180
9.3.1	渐开线直齿圆柱齿轮模型的建立和装配	180
9.3.2	滚动轴承模型的建立	181
9.3.3	轴系整体结构模型的装配	181
9.4	轴系结构的有限元分析	182
9.4.1	轴系结构有限元模型的建立	182
9.4.2	轴系结构接触对的建立	183

9.4.3	边界条件和载荷的确定	183
9.4.4	迭代求解方法	184
9.5	考虑装配误差的轴系结构静力学对比分析	184
9.6	轴系结构可靠性灵敏度分析	185
9.7	计算实例	185
9.7.1	轴系结构的有限元求解	185
9.7.2	考虑轴不平行的轴系结构静态对比分析	187
9.7.3	考虑轴不平行的齿轮静态对比分析	187
9.7.4	考虑轴不平行的滚动轴承静态对比分析	188
9.7.5	轴系结构可靠性灵敏度分析	191
9.8	小结	194
10	考虑装配误差和轴承径向游隙的轴系结构动力学及灵敏度分析	196
10.1	概述	196
10.2	轴系结构的动力学分析流程	196
10.3	轴系结构的动力学分析方法	197
10.3.1	轴系结构的有限元模型的建立	197
10.3.2	动力学求解的参数设置	198
10.4	考虑装配误差的轴系结构动力学分析	201
10.5	考虑轴承径向游隙的轴系结构动力学分析	201
10.6	轴系结构可靠性灵敏度分析	202
10.7	计算实例	202
10.7.1	轴系结构动力学分析	202
10.7.2	考虑装配误差的轴系结构动力学对比分析	206
10.7.3	考虑轴承径向游隙的轴系结构动力学分析	209
10.7.4	轴系结构可靠性灵敏度分析	213
10.8	小结	216
11	结论	218
	参考文献	221

1 绪论

1.1 课题背景及课题来源

1.1.1 课题背景

能源是人类社会赖以生存和发展进步的重要物质基础。由于化石能源的全面紧张以及环境污染日益加剧,可再生能源的开发和利用已经成为世界各国的能源发展战略之一。风能是可再生能源中发展最快的清洁能源,风力发电也是最具有大规模开发和商业化发展前景的发电方式。据全球风能协会(GWEC)统计,截至2014年年底,全球风电总装机容量已经超369 GW,2015年全球新增装机容量超过了59 GW。

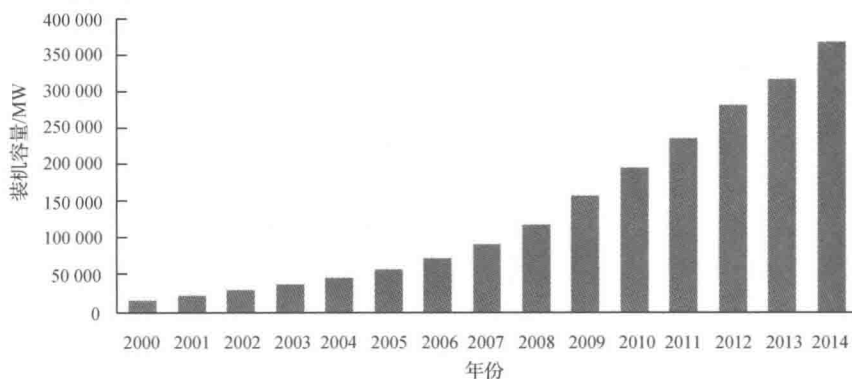


图 1.1 2000—2014 年世界风电累计装机容量

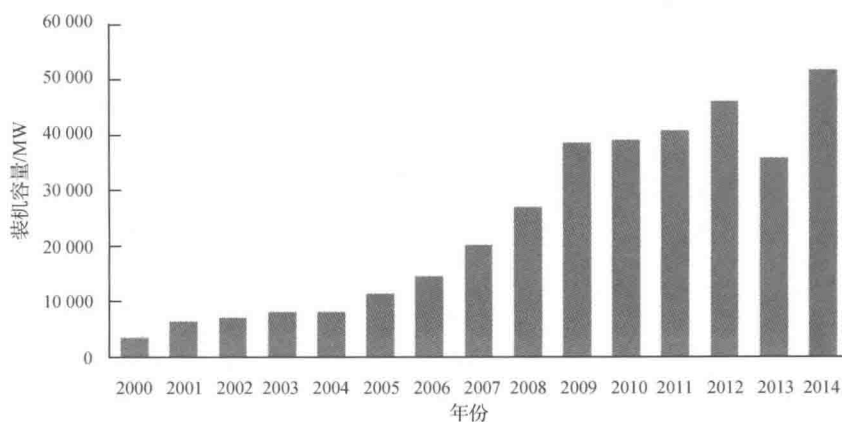


图 1.2 2000—2014 年世界风电新增装机容量

由图 1.1 和图 1.2 可以看出，全球风电产能持续每 3a 增加 1 倍的趋势。全球风能理事会和绿色和平组织联合发布的报告《全球风能展望 2014》预测：到 2020 年，风力发电可提供的电力将占全球需求的 12%，到 2030 年风力发电所占全球电力需求的份额可达到 22%。

从 2005 年开始，我国风电装机容量连续 5a 翻番增长。截至 2014 年年底，我国全年风力发电新增装机容量达 23 351 MW（图 1.3），我国风电装机总容量已经跃居全球第一。在“十二五”规划中，到 2015 年，全国累计并网运行风电装机容量达到 100 GW，年总发电量超过 190 TW·h。实际上，我国在 2013 年上半年就已经完成既定目标。

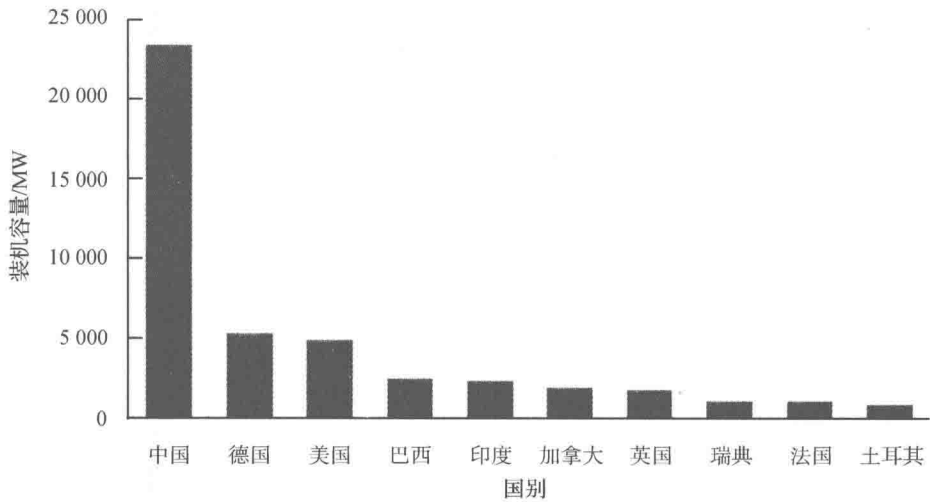


图 1.3 全球新增装机容量前 10 名

迫于市场和竞争的压力，风电场运营商尽可能地降低发电成本。提高风电机组单机容量是降低发电成本最有效的途径之一，目前世界上已并网运行的机组最大达到 6 MW，欧洲 Upwind 计划支持的正在研发的风电机组达到 8~10 MW。伴随着单机容量的增长，风电机组风轮直径不断增大，叶片、传动系统和塔架等零部件变得柔性大、阻尼小，机组低频模态越来越密集，各模态耦合概率加大，机组承受的动态载荷更加复杂严峻。这些变化大大增加了机械设计的难度，无论是整机还是零部件设计制造都遇到了一些不可避免的问题：

(1) 单机容量增大，风轮直径和扫掠面积增加使机组承受的载荷更大，更复杂。随着机组单机容量的增加，风轮直径和叶片的质量都急剧增加。1 MW 机组风轮直径只有 60 m，3 MW 机组风轮直径就达到了 100 m，风轮质量达到 85 t；而 5 MW 机组风轮直径达 126 m，每个叶片重 18 t，风轮质量达 125 t。风轮直径的增加使得在风轮扫掠范围内的风切变更显著，湍流更复杂。

(2) 由于传动系统载荷波动造成的齿轮箱、联轴器等传动部件损坏率居高不下。由于风速的时刻变化和风切变、湍流对叶片的影响，再加上风电机组传动系统的阻尼较小，传动系统载荷波动一直是造成齿轮箱和联轴器故障并影响机组可靠性的重

要因素,对 3MW 及以上容量的机组这一点更加明显。

相同功率的齿轮箱、联轴器等传动部件在其他行业都有应用并运行效果良好,但在风电机组中齿轮箱、联轴器故障率居高不下,其原因很多,一个最重要的因素就是在传动系统设计过程中未能充分地考虑风电机组运行过程中复杂的动态载荷。其动态载荷部分取决于风轮载荷、传动系统特性(传动轴和联轴器的质量、刚度、阻尼)以及发电机的特性、运行过程附加载荷和外部工作条件。

(3) 零部件固有频率降低,各零部件之间的振动耦合程度提高。单机容量的不断增大,载荷的增加使得对各部件的强度要求增加,同时部件的刚度增加、固有频率下降。叶片的挥舞、风轮的旋转、塔影效应、风轮的不平衡载荷以及外界风的变化和各零部件的振动耦合概率都增加。

综上所述,风电机组的单机容量会不断增大,风湍流、风切变、塔影效应、机组运行引起的动态载荷对大型风电机组及其零部件设计与可靠性的影响越来越大。如何有效地减小机组运行过程中的振动量,提高传动系统运行可靠性成为大功率风电机组设计必须考虑的问题,同时准确有效的载荷分析计算逐渐成为风力发电领域的一个新的研究热点。

1.1.2 研究意义及目的

我国风能资源丰富地区的地形地貌都比较复杂,风流具有空间不均匀性、时间非定常性、湍流强度高等特点。风电机组运行环境的非均匀性和非稳态性导致了载荷的随机性,同时塔架、风轮、机舱会产生附加运行载荷作用。风电机组长期工作在恶劣的自然环境下,运行情况非常复杂,因此,保证风电机组在设计寿命 20a 中安全可靠地运行是风电场首先要考虑的问题。风电机组随着运行时间的增加,风轮叶片、主轴、齿轮箱、联轴器、发电机以及控制系统等可能出现各种故障,这将降低机组的可利用率。据不完全统计,目前我国风电场中风电机组的平均可利用率普遍低于 95%,风电机组故障率高是一个主要的因素。风电机组故障的发生不仅严重影响发电量,而且增加了风电场的维护成本,降低了风电场的经济效益。

目前风电机组多以水平轴为主,风电机组单机容量最大可达到 6 MW。采用齿轮箱增速双馈异步变速发电机的兆瓦级风电机组是目前风电市场中的主流机型。这类风电机组的主要优点是具有较高的风能利用系数,年发电量大;并网时对电网冲击电流小;启动性能和制动性能好。但由于结构和控制系统比较复杂,故障率和成本相对较高。

目前,我国对风力机的研究提出了一些办法,解决了一定的风力机问题,但从风电场工程实际出发还存在一定的局限性。主要表现如下:

(1) 风力机载荷计算脱离了运行环境。目前风力机载荷设计通常只是考虑风力机在单一风载荷极限状态作用下的静力学分析,而忽略风力机所处风电场实际上多变的气候条件和地理环境。由于这些因素影响,实际上风电场的湍流、尾流互扰对

风力机的运行安全性影响更为严重。在很多文献中,在进行风电机组风载荷的设计变量和传动系统约束条件的设置上过于简单,而另一些学者在进行风载荷计算时又过于复杂,不利于工程实际应用。

(2) 忽略了风力机运行过程附加载荷的影响。风力机在运行过程中,不仅受到风载荷的影响,还受到风力机运行过程中的偏航、变桨过程中的附加动载荷的影响。在风力机的常规设计中往往忽略了运行载荷作用,而实际风力机传动系统在运行过程中也受到的运行载荷的影响,需在风力机传动系统设计时进行考虑。

(3) 在进行风电设备传动系统结构设计时,只是单一地对传动系统中的零部件进行分析设计,没有从整个传动系统角度进行研究,具有一定的局限性。

(4) 目前,国内结合风电机组运行过程振动载荷和冲击载荷作用下,风载荷对风力机传动系统进行振动特性评价的文献几乎没有,即没有对风电机组流固耦合作用下风力机传动系统振动特性评价。但实际风电设备在 20 a 的工作寿命中,受流、固载荷复合作用影响明显,单从一个角度进行分析存在一定的局限性。

1.1.3 课题来源

对风力机运行特性研究,除了设计和制造因素影响外,还受到运行环境的影响。而运行因素(随机气动载荷和运行载荷)对风力机传动系统的性能、可靠性和成本的影响程度甚至高于设计、制造和装配的因素,故风力机传动系统的运行特点有很强的地域特点。因此,国内外风电企业越来越关心的不仅仅是风力机设计和制造本身,而是将运行因素考虑其中,将两者结合起来进行综合考虑。

本课题从风力机传动系统本身设计特点出发,结合风力机随机气动载荷、运行载荷,将固体载荷和流体载荷耦合后引入风电机组传动系统整体振动分析设计中,属于国家自然科学基金青年项目的一部分。另外,本课题得到了内蒙古大唐国际横向课题项目资助。其中风资源数据与风电设备数据来自内蒙古大唐国际卓资二号风电场实测数据及沈阳工业大学风能技术研究所自主研发的 1.5 MW 双馈式风力发电机组实验数据。

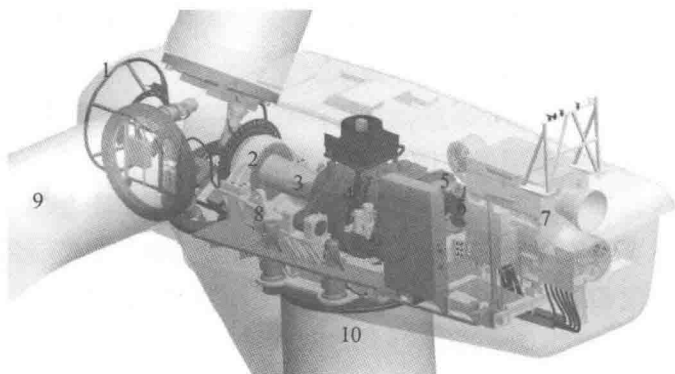
1.2 风力机传动系统

1.2.1 传动系统概述

风力机传动系统的主要功能是将能量由叶轮传递至发电机。垂直轴风力机的传动系统可以放置在地面上便于安装与维修,水平轴风力机的齿轮箱通常安装在塔筒顶部。由于当前大型风力机均采用水平轴结构形式,因此本文主要研究水平轴风力机传动系统的运行特性。

风力机系统可分为 4 个子系统:气动子系统、传动子系统、电气子系统和控制

子系统。控制子系统将前面 3 个子系统连接起来,形成风力机的闭环控制系统。从建模的角度,风力机的动态过程可以看成是这些子系统相互耦合构成的。其中,传动系统主要由轮毂、主轴、齿轮箱、高速轴、联轴器及制动盘等部件组成(图 1.4)。主轴位于叶轮和齿轮箱之间,将叶轮产生的扭矩传递给齿轮箱。齿轮箱将低速、高扭矩的输入转化为适合发电机使用的高转速、低扭矩的动力输出。齿轮箱的输入端或输出端设置刹车装置,一般位于高速轴上,因为这种结构需要的制动扭矩较小,刹车系统价格也相对较低。



1. 轮毂 2. 主轴轴承 3. 主轴 4. 齿轮箱 5. 制动器
6. 高速轴（联轴器与制动盘） 7. 发电机 8. 底盘 9. 叶片 10. 塔筒

图 1.4 典型风力机传动系统结构

需要指出的是,并不是所有风力机传动系统都需要这些部件。直驱型风力机取消齿轮箱,叶轮直接与机相连。这种风力机避免了齿轮箱造成的机械失效,但是需要体积相对较大且价格昂贵的发电机。因目前我国风力机机型 80% 以上为带齿轮箱结构,故本文以此结构作为研究对象。

并网型水平轴风力机总的动态性能是由风轮、传动系统和发电机动态特性组成的。结构动态特性指叶片、塔架等关键部件的结构振动特性,它主要影响风力机结构上的瞬态载荷,因而影响风力机系统的疲劳寿命。风轮、传动系统和发电机的动态特性主要影响传动系统、发电机部件上的瞬态载荷。要正确分析风力机动态性能,设计良好的控制系统,首要的条件就是需要一个合理可行的传动系统模型。

然而,相对于风力机的其他部分,在传动系统方面开展的研究比较少,主要集中在刚性的传动系统方面,在柔性传动系统方面的工作也才刚刚开始,得到的模型过于复杂,不能普遍应用于风力机性能的计算中。

风力机主传动系统位于风轮和发电机之间,将风轮吸收的风能以机械能的方式传递到发电机,其驱动载荷来源于风力机的气动载荷,并拖动发电机电磁转矩负荷,传动系统的动负荷则取决于输入端(风轮)、输出端(发电机)的特性和主、从动部件(轴和联轴器)的质量、刚度和阻尼,机舱的布置形式,控制和制动方式以及外部工作条件等因素。因此,确立风力机传动系统的载荷条件是研究其动态性能的重要环节。

1.2.2 研究现状

与其他机械系统相比,风力机传动系统具有自身的特殊性:第一,它的叶片处于随机风场之中,整个系统工作在复杂的随机变工况状态;第二,它是由多个变形柔性部件组合而成的高度非线性动力学系统,由风场等引起的随机变工况条件给系统的动态稳定性带来十分不利的影响;第三,其传动系统需要承受高度不稳定的载荷输入和比其他传动机构高得多的疲劳循环。这些因素给风力机传动系统的设计技术带来了极大的挑战。近 10 a 来,广大学者针对风力机传动系统的动态特性进行了较多的研究。

2005 年,朱才朝等建立了风力机齿轮传动系统的非线性模型,在考虑了时变刚度、齿侧间隙及制造误差等因素的情况下分析了系统的动态特性。李东东等建立了包括风电机组机械传动系统和发电机动态方程的分析模型,分析了风力机组的机械和电器动态特性,更全面地反映了风电机组的动力学特性。2006 年,A. Heege 用有限元方法建立了风电机组的多体动力学模型,用叶素理论计算风力机的气动载荷,在紧急制动工况下对叶片、主轴和齿轮箱的载荷变化情况进行了仿真计算。王旭东等研究了 1.5 MW 风力机齿轮箱在刚度激励和误差激励作用下的动态响应,并确定了增速箱的振动烈度。2007 年,邢子坤在考虑外界变化风载荷的情况下,建立了风力机齿轮传动系统的动力学模型,通过求解该模型得到了动载系数、使用系数以及滚动轴承载荷系数的曲线。在此基础上对齿轮传动系统进行了全面的评估,并将结果与常规设计进行了对比,具有较高的实用价值。2008 年,马朝峰等利用某风电增速齿轮箱行星传动系统的扭转动力学模型,计算了太阳轮的浮动量和主要零件的动态均载系数,对系统的均载性能进行了定量分析。秦大同等考虑了系统的内部激励和风速变化引起的外部激励,用集中参数法建立了传动系统的动力学模型,在求得系统动态响应的基础上进行了可靠性优化设计。郭爱贵等通过对风电增速箱的有限元分析,获取了各级齿轮副的齿廓和齿向修形数据以及各个零件的应力云图。2009 年,秦大同等对某 1.5 MW 风电齿轮箱进行了耦合振动分析,计算了系统在风载、时变啮合刚度和系统阻尼作用下的动态响应,并以系统扭振加速度幅值最小和质量最小为目标进行了系统优化;并应用柔性多体动力学对风力机传动系统的动力学特性进行了数值仿真和分析。

2010 年,林茂峰等针对故障频发的 750 kW 风电齿轮箱建立了虚拟样机模型,运用 ADAMS 进行系统薄弱环节动力学分析,并改进了该齿轮箱的齿数配置。张庆伟等在得到风电齿轮系统振动方程解析解的基础上,利用混合离散变量组合型法对兆瓦级风电齿轮箱的体积/质量进行了优化设计。2011 年,丁习坤等利用有限元模型对 750 kW 风电齿轮箱进行了冲击载荷下的动力学仿真,得到系统力与力矩的突变曲线。Wang Xiaosun 等建立了风力机齿轮传动系统非线性动力学模型,进行了数值仿真,并分析了系统的非线性动态特性。陈会涛从风力机齿轮传动系统固有特性

分析入手,先后对传动系统的振动状态、载荷随机性对系统动力特性的影响等方面对风力机齿轮传动系统振动特性进行分析,并通过实际测试验证其分析方法。2012年,郑甲红在分析传统动力学模型的基础上,通过将平移—扭转振动模型应用于兆瓦级风力机的传动系统,从而建立起针对该型号风力机行星传动系统的动力学数学模型。考虑系统的激励分析后,建立系统的动力学方程。再结合自由振动运算方程,对系统进行模态分析。2012年,周志刚将风力发电机齿轮传动系统齿轮—轴承耦合后进行分析研究,根据随机风作用下各齿轮和轴承的动载荷,基于有限元方法、赫兹接触理论和准静态方法,求得了系统各齿轮副和各轴承的动态接触应力。采用雨流计数法和数理统计理论,得到系统各构件动态接触应力的概率分布形式,利用 Monte Carlo 仿真试验得到零件疲劳强度的概率分布,并通过实验方法对预测的疲劳寿命和动态性能进行验证,得到很好的效果。2014年,苏利营等以风力机柔性风轮与低速轴系的动力学特性强耦合问题进行研究,以 1.2 MW 风力机风轮与低速轴系为研究对象,建立其耦合系统的物理模型并作合理性等效;同时将其单一叶片简化为悬臂梁并采用二节点四自由度梁单元进行有限元分析。运用混合单元对耦合系统模型进行有限元建模,并用模态叠加法得到耦合系统的固有频率与变形云图,并进行结果分析。2014年,谢里阳等从风力机服役地域位置和时间两个方面描述风力机载荷历程的概率特性,并以此为基础,通过复杂载荷历程不确定性表征方法、随机变幅载荷历程下疲劳累积损伤与等效循环应力计算方法、应力分布和条件寿命分布计算方法,以及多级小样本疲劳寿命试验确定风力机传动系统不同循环应力水平下传动系统疲劳寿命分布参数的方法。2015年,张盛林等研究考虑风力机塔筒摆动与传动链扭转振动的耦合效应,利用集中参数法建立基于柔性支撑的兆瓦级风力机传动链耦合动力学分析模型,揭示其动态特征及变化规律,利用坎贝尔图对潜在共振点进行分析,得到切入转速与传动链之间潜在共振频率。

1.3 相关领域研究现状

1.3.1 风力机气动载荷研究

1.3.1.1 风力机空气动力学研究

风力机的气动性能决定于叶片的气动特性,而早期叶片翼型则沿用了机翼翼型,风力机气动性能的研究则大量引用了螺旋桨空气动力学领域的研究成果。在空气动力学的研究领域内,主要的工作是对旋转下的层流边界层和紊流流动的研究。

20世纪80年代出现了风力机专用翼型,如美国的 SERI 系列、NREL 系列,丹麦的 RISØ 系列,瑞典的 FFA-W 系列等翼型,从此,针对风力机低速流动下的气动力研究才得以开展,主要的研究重点是对风力机尾涡流动的研究。例如,1978年, Gohard 给出水平轴风力机全自由尾迹模型;1987年, Hernande 假设的一种拖体涡与