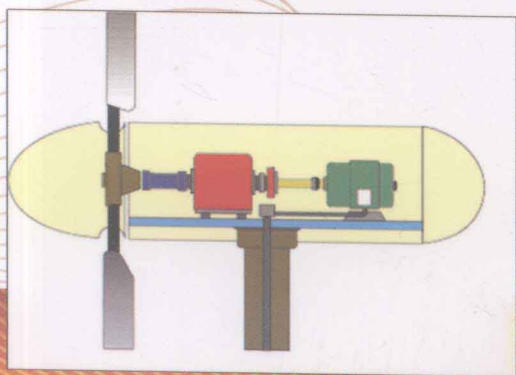




普通高等教育风能与动力工程专业系列教材

# 风力发电机组 监测与控制

WIND GENERATOR'S  
MONITORING AND CONTROL



© 叶杭冶 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

本书介绍风力发电机组的监测与控制技术。首先介绍了定桨距恒速风力发电机组监测与控制的基本内容。然后介绍风力机的基本特性,传动系统的结构及其动态特性,双馈异步发电机及变流器和永磁同步发电机及变流器的特性;讨论了双馈异步发电机和永磁同步发电机的并网技术及其对电网稳定性的影响;在此基础上介绍了变速恒频风力发电机组的基本控制目标、控制策略与控制方法;介绍了控制系统的设计方法,工具软件的应用以及外部控制器的设计与实现;对控制系统的执行机构也做了简要介绍。最后介绍了风力发电机组的状态监测与性能测试技术。

本书可作为高等学校本科和研究生教学用书,也可供从事风力发电技术研究的工程技术人员参考。

## 图书在版编目(CIP)数据

风力发电机组监测与控制/叶杭冶主编. —北京:机械工业出版社, 2011.6

普通高等教育风能与动力工程专业系列教材  
ISBN 978-7-111-34255-7

I. ①风… II. ①叶… III. ①风力发电机组-控制系统-高等学校-教材②风力发电机组-监测-高等学校-教材 IV. ①TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第072742号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:王雅新 责任编辑:王雅新

版式设计:张世琴 责任校对:程俊巧

封面设计:张静 责任印制:杨曦

北京京丰印刷厂印刷

2011年8月第1版·第1次印刷

184mm×260mm·13印张·320千字

标准书号:ISBN 978-7-111-34255-7

定价:28.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203

封面无防伪标均为盗版

# 普通高等教育风能与动力工程专业 系列教材编审委员会

主任 贺德馨

副主任 徐大平 杨勇平 田 德

委员 (按姓氏拼音排名)

戴慧珠	邓 英	韩 爽	康 顺	黎作武	刘永前
柳亦兵	吕跃刚	齐同庆	芮晓明	施鹏飞	施跃文
宋 俊	王伟胜	王雅新	许国东	姚兴佳	叶杭冶
赵 斌	张世惠	张晓东	章立栋	朱永强	

# 序

开发利用风能是增加能源供应、调整能源结构、保障能源安全、减排温室气体、保护生态环境和构建和谐社会的一项重要措施，对于建设资源节约型和环境友好型社会，实现中国经济、社会可持续发展具有重要促进作用。目前，风力发电是风能利用的最主要方式。自2006年《中国可再生能源法》实施以来，我国风电连续多年保持快速增长，2010年成为全球风电新增和累计装机容量最多的国家，在短时间内步入世界风电大国行列。

随着我国风力发电产业的规模化发展和风能利用技术的不断进步，风力发电专业人才的培养显得越来越重要。2006年，教育部批准在华北电力大学设置了国内第一个“风能与动力工程”专业，之后国内多所高等院校也陆续设置了该专业。由于“风能与动力工程”专业是新专业，因此，其专业课程设置、教材建设和教学方法研究都需要一个探索和实践的过程。在中国政府/世界银行/全球环境基金—中国可再生能源规模化发展项目（CRESP）风电技术人才培养子赠款项目和中国—丹麦风能发展项目（WED）资助下，2008年成立了“风能与动力工程”本科专业教材编审委员会，开始组织编写“风力发电原理”、“风力机空气动力学”、“风力发电机组设计与制造”、“风力发电机组监测与控制”、“风力发电场”和“风电场电气工程”六部必修课教材。

风力发电是一个跨学科的专业，涉及许多学科领域。在专业教材编写时，从专业人才培养目标出发，除了要掌握专业基础知识外，还要掌握风能领域中的专业知识。教材初稿经过在华北电力大学本科学生的试用后，又对内容进行了修改和补充，形成了现在的第一版系列教材。随着我国从“风电大国”向“风电强国”，从“中国制造”向“中国创造”，从“国内市场”向“国际市场”的转变，我国风力发电产业将进入一个新的发展阶段，教材内容也需要不断补充和更新。编审委员会将会根据新的需求，结合教学实践对此系列教材不断进行完善。

在本教材编写和出版过程中，得到了中国可再生能源学会风能专业委员会、华北电力大学和机械工业出版社的具体指导，各书编审人员付出了辛勤的劳动，许多专家为本教材提供资料并审阅书稿，在此一并向他们表示衷心的感谢。

本教材除了用于高等院校“风能与动力工程”专业教材外，也可作为从事风电专业科技工作人员的参考书。

**“风能与动力工程”专业教材编审委员会**  
二〇一一年六月

# 前 言

风力发电是低碳经济的标志性产业，虽然我国起步较晚，但后来居上，在风电装机容量和风电装备制造方面均已居世界前列。但作为风力发电核心技术之一的控制与测试技术与国外还有很大差距。为了提高自主研发能力，培养专门技术人才，华北电力大学等多所学校设立了风力发电本科专业，并将风力发电机组的控制与测试技术作为专业课程之一。

本书介绍风力发电机组控制与测试技术研究的基本内容及控制系统的设计方法。为了便于学习与掌握，按照风力发电技术的发展，首先介绍定桨恒速风力发电机组的控制与监测技术。然后引入风力机的基本特性，传动系统的结构及其动态特性，双馈异步发电机及变流器和永磁同步发电机及变流器的特性。在此基础上介绍变速恒频风力发电机组的基本控制目标、控制策略与控制方法；介绍了控制系统的设计方法及工具软件的应用；讨论双馈异步发电机和永磁同步发电机的并网技术及对电网稳定性的影响。最后介绍了风力发电机组的状态监测与性能测试技术。

学习理解本书的内容，需要风能空气动力学、发电机及电力电子技术、现代控制技术、计算机实时控制等相关技术学科的支持。为了便于高等学校的本科教学，针对各章节的基本内容均附有练习题，可据此安排重点教学内容，其他内容可根据学生的兴趣进行拓展。

本书由叶杭冶、许国东、邓英、章立栋等编写，其中叶杭冶编写了第一、二、三、五章，并编写了本书的习题；许国东编写了第四章和第六章第一节、第七章第一~六节、第八章第一节；邓英编写了第七章第七、八节、第八章第二节，并参与了本书习题的编写；章立栋编写了第六章第二、三、四、五节。全本由叶杭冶负责统筹定稿。本书最初于2009年完成，通过2009年和2010年两个学期的试用，反馈了大量意见，其中大部分予以采纳，但为了能够兼顾到完整性和实用性，在内容的广度和深度方面做了适当取舍。在本书的出版过程中，贺德馨研究员主持的教材编写委员会对本书的内容提出了许多修改意见；中国科学院电工研究所的专家也对本书的修改提出了许多宝贵意见和建议。卫江涛博士作为Bladed软件的培训师，审阅修改了第六章工具软件的应用部分。在此深表感谢。

本书主要作为高等学校本科和研究生教学用书，也可作为从事风力发电技术研究的工程技术人员的参考书。由于风力发电技术涉及面广，发展日新月异，作者水平有限，书中难免有疏漏与错误之处，恳请读者批评指正。

编者

2011年于杭州

# 目 录

序	
前言	
第一章 绪论	1
第一节 控制技术的研究内容	1
第二节 风力发电机组的总体结构	2
第三节 控制系统的作用	4
第四节 控制系统的结构	5
练习题	8
第二章 定桨恒速风力发电机组的控制	9
第一节 定桨恒速风力发电机组的工作原理	9
第二节 定桨恒速风力发电机组的监测与运行控制	13
第三节 定桨恒速风力发电机组的发电过程控制	22
第四节 定桨恒速风力发电机组的制动与保护系统	24
练习题	27
参考文献	27
第三章 风力发电机组的特性分析	30
第一节 风力发电机组的基本特性	30
第二节 传动系统的动态特性	34
第三节 发电机及变流器的特性	36
练习题	46
参考文献	47
第四章 风力发电机组的并网技术	48
第一节 定桨恒速风力发电机组的软并网技术	48
第二节 双馈异步风力发电机组的并网技术	56
第三节 永磁同步风力发电机组的并网技术	59
第四节 风力发电机组对电网稳定性的影响	61
练习题	69
参考文献	69
第五章 变速恒频风力发电机组的控制	70
第一节 变速恒频风力发电机组的控制目标	70
第二节 变速恒频风力发电机组的控制策略	71
第三节 常用的控制方法和手段	77
练习题	81
参考文献	81
第六章 变速恒频风力发电机组控制器的设计	82
第一节 控制系统的设计方法	82
第二节 控制系统的设计过程	92
第三节 查表控制与最优控制	110
第四节 外部控制器的设计	117
第五节 外部控制器的实现	133
练习题	146
参考文献	147
第七章 控制系统的执行机构及传感器	148
第一节 气动制动机构与机械制动机构	148
第二节 偏航系统	150
第三节 液压系统	153
第四节 变桨系统	157
第五节 变流系统	162
第六节 自动润滑系统	165
第七节 温度监控传感器	166
第八节 安全保护控制回路传感器	167
练习题	171
参考文献	171
第八章 风力发电机组的状态监测与性能测试	173
第一节 风力发电机组的状态监测	173
第二节 风力发电机组的性能测试	185
练习题	199
参考文献	199

# 第一章 绪 论

风力发电产业的高速发展，促进了风力发电技术的不断进步，为风力发电产业更大规模的发展提供了可能。在风力发电技术的发展过程中，控制技术始终起着主导作用，并且随着风力发电技术的发展，其重要性更加突出。

## 第一节 控制技术的研究内容

风力发电机组的控制系统是综合性控制系统。它不仅要监视电网、风况和机组的运行参数，在各种正常或故障情况下脱网停机，以确保运行的安全性与可靠性；还要根据风速与风向的变化，对机组进行优化控制，以保证机组稳定、高效地运行。

20 世纪 80 年代中期，定桨恒速风力发电机组开始进入风力发电市场，它主要解决了风力发电机组的并网问题和运行的安全性与可靠性问题。定桨恒速风力发电机组采用了软并网技术、空气动力制动技术、偏航与自动解缆技术，这些都是并网运行的风力发电机组需要解决的最基本的问题。由于功率输出是由桨叶自身的性能来限制的，叶片的桨距角在安装时已经固定，而发电机的转速受到电网频率限制。因此，只要在允许的风速范围内，定桨恒速风力发电机组的控制系统在运行过程中对由于风速变化引起输出能量的变化是不作任何控制的。这就大大简化了控制技术和相应的伺服传动技术，使得定桨恒速风力发电机组能够在较短时间内实现商业化运行。

20 世纪 90 年代初期，基于高转差异步发电机进行有限变速的全桨变距风力发电机组开始进入风力发电市场。采用全桨变距的风力发电机组，起动时可对转速进行控制，并网后可对功率进行控制，使风力发电机组的起动性能和功率输出特性都有显著的改善。这时，风力发电机组的液压系统不再是简单的以制动为目的的执行机构，为实现变桨控制，它采用电液比例阀或电液伺服阀组成了闭环控制系统，使风力发电机组的控制水平提高到一个新的阶段。

由于有限变速的全桨变距风力发电机组在额定风速以下运行时的效果仍不理想，到了 20 世纪 90 年代中期，基于变速恒频技术的全桨变距风力发电机组开始进入风电市场。变速恒频风力发电机组与定桨恒速风力发电机组的根本区别在于，变速恒频风力发电机组允许叶轮转速跟随风速在相当宽的范围内变化，从而使机组获得最佳功率输出特性。变速恒频风力发电机组的主要特点：低于额定风速时，它能最大限度跟踪最佳功率曲线使风力发电机组具有较高的风能转换效率；高于额定风速时，它可以增加传动系统的柔性，使功率输出更加稳定，特别是解决了电能闪变与功率因数等问题后，达到了高效率、高质量地向电网提供电能的目的。风力发电机组从定桨恒速运行发展到基于变速恒频技术的变速运行，实现了从能够向电网提供电能到理想地向电网提供电能的转变。

## 第二节 风力发电机组的总体结构

并网型风力发电机组形式有采用笼型异步发电机的定桨恒速风力发电机组（见图 1-1）和全桨变距风力发电机组，采用双馈式异步发电机（见图 1-2）和采用永磁式同步发电机的变速恒频风力发电机组（见图 1-3）。

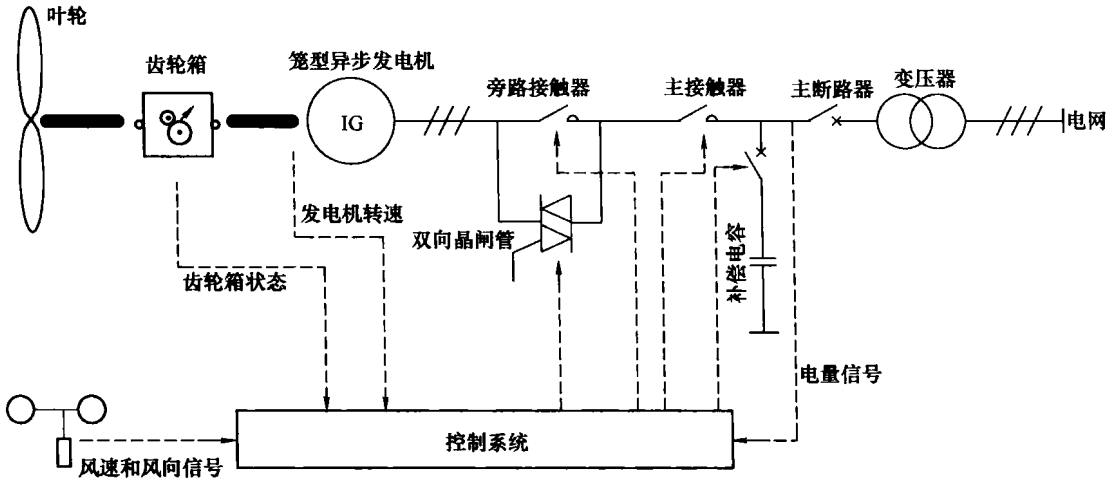


图 1-1 定桨恒速风力发电机组总体结构

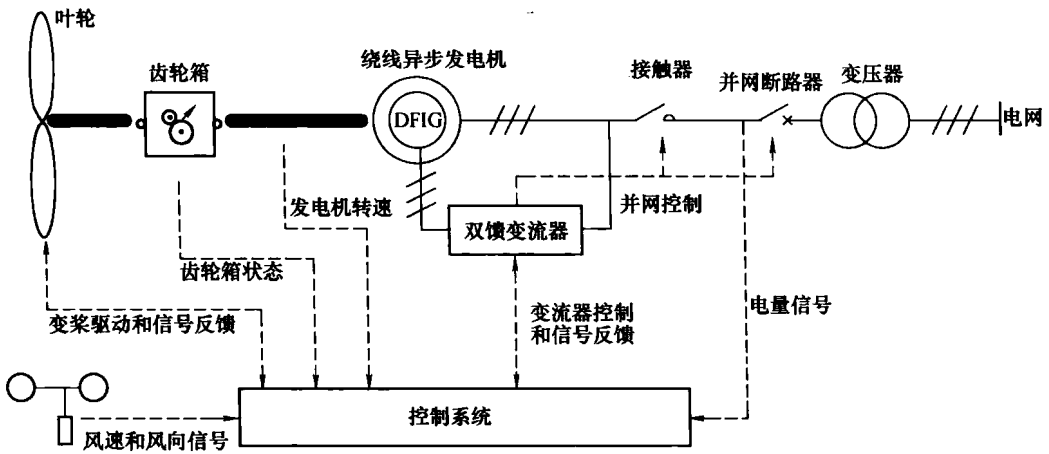


图 1-2 双馈异步式变速恒频风力发电机组总体结构

叶轮是吸收风能并将其转换成机械能的部件，风以一定的速度和攻角作用在桨叶上，使桨叶产生旋转力矩而转动，将风能转换成机械能，各种机型的叶轮一般均采用水平轴、三叶片、上风向布置。叶轮通过增速齿轮箱带动发电机，或者也可直接带动低速发电机。

定桨恒速风力发电机组的叶轮大都采用桨叶与轮毂刚性连接的结构，即所谓定桨距叶轮。桨叶尖部 1.5 ~ 2.5m 部分，一般设计成可控制的叶尖扰流器。当风力发电机组需要脱



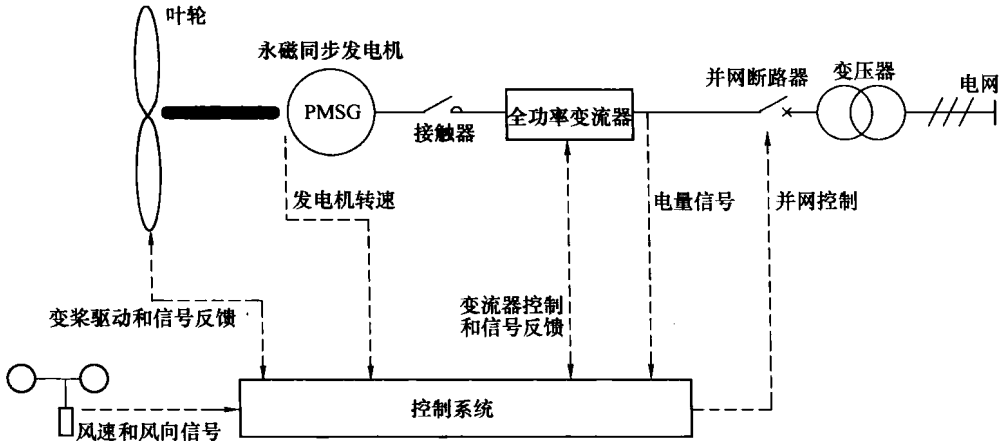


图 1-3 永磁同步式变速恒频风力发电机组总体结构

网停机时，叶尖扰流器可按控制指令释放并旋转大角度形成气动阻力，使叶轮转速迅速下降，这一功能通常称为空气动力制动。

近年来，随着风力发电机组设计水平的不断提高，在大型风力发电机组，特别是兆瓦级机组（1000kW 以上）的设计中，已采用变桨距叶轮，桨叶与轮毂不再采用刚性连接，而通过专门为变距机构设计的变距轴承连接。这种叶轮可根据风速的变化调整气流对叶片的攻角，当风速超过额定风速后，输出功率可基本稳定地保持在额定功率上；特别是在大风情况下，风力发电机组处于顺桨状态，使桨叶和整机的受力状况大为改善。

由于风力发电机组启动/停车频繁，叶轮又具有很大的转动惯量，通常叶轮的转速都设计在 20r/min 左右，机组容量越大，转速越低，因此，在叶轮与发电机之间需要设置增速器。大型风力发电机组的机械传动系统都沿中心线布置，因此增速器大多采用结构紧凑的行星齿轮箱。

风力发电机组中的发电机一般采用异步发电机，对于定桨恒速风力发电机组，一般还采用双绕组双速笼型异步发电机，这一方案不仅解决了低功率时发电机的效率问题，而且改善了低风速时的叶尖速比，提高了风能利用系数并降低了运行时的噪声。

对于定桨恒速风力发电机组和全桨变距有限变速风力发电机组，发电机并网过程采用晶闸管限流软切入，过渡过程结束时，旁路接触器合上，晶闸管被切除，风力发电机组进入发电运行状态，如图 1-1 所示。

变速恒频风力发电机组主要有双馈异步式和永磁同步式两种。双馈异步式变速恒频风力发电机组的发电机定子直接与电网相连，转子通过变流器与电网相连，由定子和转子两侧向电网输出电流，如图 1-2 所示。低速永磁同步式变速恒频风力发电机组不带增速齿轮箱，发电机转子为永磁体，由定子通过全功率变流器向电网输电，如图 1-3 所示。这两种机组都可以由变流器实现无冲击并网和脱网。

最近几年进入风力发电领域的变速恒频风力发电机组已成为风力发电的主流机型，其主要特点是在变桨距风力发电机组的基础上采用了转速可以在大范围变化的双馈式异步发电机或永磁式同步发电机及相应的电力电子技术，通过对最佳叶尖速比的跟踪，使得风力发电机

## 4 风力发电机组监测与控制

组在所有的风速下均可获得最佳的功率输出。

在风力发电机组的控制中，变桨距控制和变速控制一般不是可以独立地用作风力发电机组控制的两种控制方案，而是互相支持、互相依存的两种技术。没有变速控制的变桨距风力发电机组或没有变桨距控制的变速风力发电机组都是难以稳定运行的。

### 第三节 控制系统的作用

风力发电机组的动态特性是构成机组的各部件的动态特性的总和，它包括叶轮（桨叶）的气动特性、传动系统的动态特性、发电机的动态特性及控制系统的动态特性，如图 1-4 所示。

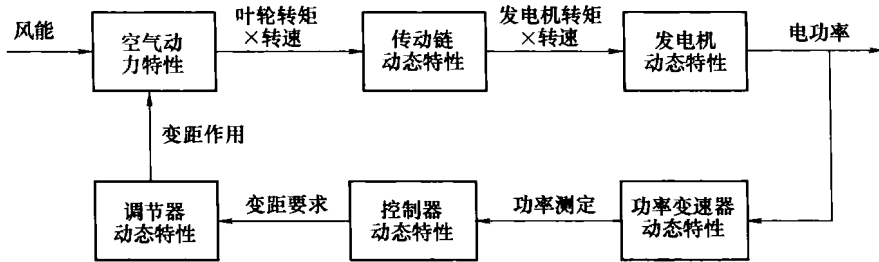


图 1-4 风力发电机组的动态特性

对于风力发电机组的设计，特别是变速恒频风力发电机组，还应考虑整机的结构动力学问题，以便机组在运行或调节过程中避开系统的自振频率。

一台已设计好的风力发电机组，其动态特性是确定的，即对于任何给定的输入，它有一个确定的输出响应。如果输入是恒定的，我们可以通过设计，使得系统具有最佳输出；如果输入是变化的，我们希望系统能根据变化来进行适当的调整，使系统保持最佳输出。控制系统的作用就是根据它所接收到的机组及其运行环境信息，调节机组，使其按照预先设定的要求运行。

对于定桨恒速风力发电机组，当输入变化时，控制系统对机组的调整非常有限，如当风向改变时，通过偏航系统调整其叶轮方向，或在风速变化时切换发电机绕组，进行变极调速，对其动态响应特性没有施加任何影响，因此，在输入变化的情况下，风力发电机组只有很小机会运行在最佳状态下。机组的控制方式如图 1-5 所示。

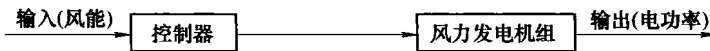


图 1-5 定桨恒速风力发电机组的控制方式

对于变速恒频风力发电机组，由于采用了闭环控制（见图 1-2），控制系统完全决定了系统的动态响应特性，并且可以根据输入的变化对输出进行控制。

表示风力发电机组动态特性的微分方程通常写成如下形式：

$$I\Phi'' + B\Phi' + K\Phi = T_A \quad (1-1)$$

式中， $I$  为风力发电机组的转动惯量； $B$  为阻尼系数； $K$  为传动系统刚性系数； $T_A$  为驱动

力;  $\Phi$  为轴的旋转角度。

当系统加入控制力  $F_c$  后, 其动态特性方程改变为

$$I\Phi'' + B\Phi' + K\Phi = F_A - F_c \quad (1-2)$$

假定控制力  $F_c$  是以比例加积分的方式作用在旋转轴上的, 即

$$F_c = k_1\Phi + k_2\Phi' \quad (1-3)$$

这时, 微分方程可以写成

$$I\Phi'' + (B + k_2)\Phi' + (K + k_1)\Phi = F_A \quad (1-4)$$

其中阻尼系数从  $B$  增加到  $(B + k_2)$ , 刚性系数从  $K$  增加到  $(K + k_1)$ 。

从式 (1.4) 可以看到, 由于控制系统的作用, 改变了系统的动态特性, 但系统的物理参数和所受的外力并没有改变。

## 第四节 控制系统的结构

图 1-6 是一个典型的双馈式变速恒频风力发电机组控制系统的结构图。

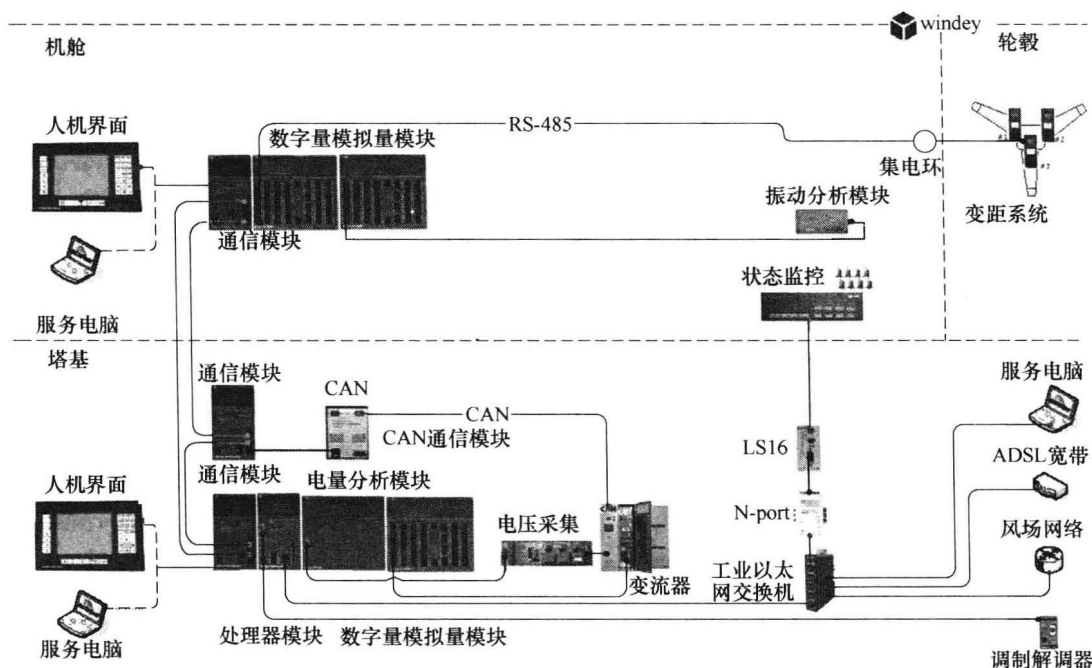


图 1-6 控制系统的总体结构

控制系统由位于机舱和塔基的两部分构成, 采用高度模块化分布式配置。机舱核心控制部分占一组模块, 由通信模块和输入输出模块组成。通信模块提供通信接口和人机界面 (HMI) 接口, 可选择工业触摸屏或笔记本型电脑作为人机界面; 输入输出模块提供数字量和模拟量的输入输出、PT100 输入以及通信接口, 可实现风速、风向、转速、位置、温度、压力等信号的测量或控制, 同时可实现与振动传感器和轮毂内变距系统的通信。塔基控制部分有两组模块, 一组由主控制模块、通信模块、电网测量模块和输入输出模块组成, 另一组

## 6 风力发电机组监测与控制

为单独的通信模块。三个通信模块通过光缆可实现塔上塔下控制组之间的通信环网，塔基通信模块同时提供人机界面接口和与变流系统的 CANopen 协议现场总线通信。主控制模块实现控制软件的运行，电网测量模块实现对电网参数如电压、电流的采集和计算。

控制系统的通信联系如图 1-7 所示。

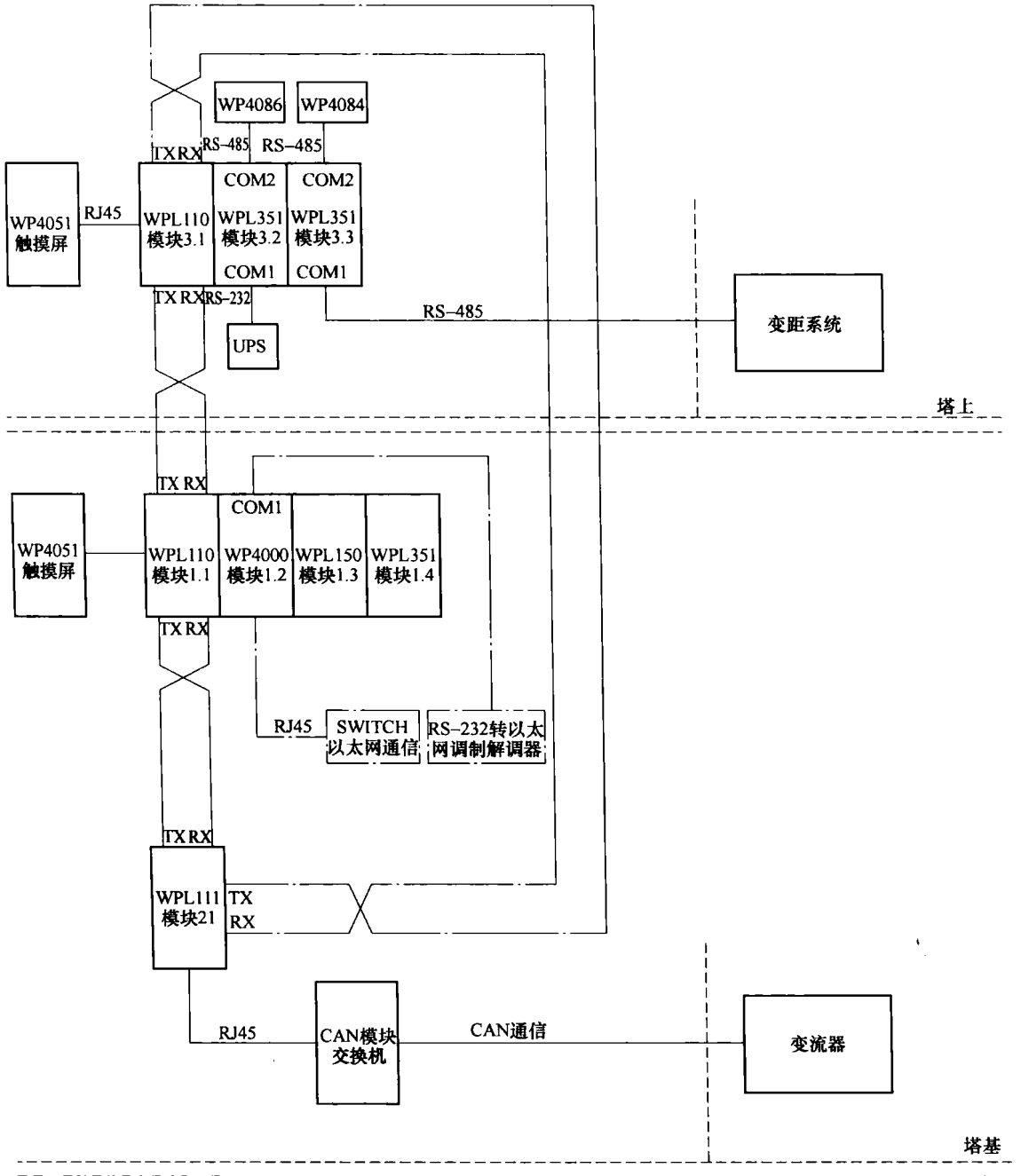


图 1-7 控制系统通信联系

控制系统的核心部件位于塔基控制柜，机舱采集传感器输入信号由通信模块转为光纤通信经塔筒到达塔基控制柜的通信模块，经中央处理器的处理后，由光纤通信返回机舱，控制各传感器执行元器件输出。

机舱控制柜与塔基控制柜采用光纤通信，塔基控制柜模块将光纤信号转为以太网信号，CAN 模块将以太网信号转为 CAN 信号，与变频器的 CAN 通信，风电场与风力发电机组间的光纤通信通过以太网转光纤交换机实现风电场的环网通信，远程监控为以太网通信。

机舱控制柜模块配置示例见表 1-1。机舱控制柜的主要工作任务如下所述。

表 1-1 机舱控制柜模块配置

<p>WP4051 (触摸屏)</p>	<p>WPL110 (电源、通信模块)</p>	<p>WPL351 (I/O 模块)</p>	<p>WPL351 (I/O 模块)</p>
<p>(1) Linux 操作系统 (2) 以太网接口</p>	<p>(1) 两路模块供电输出 (2) 冗余光纤通信接口 (3) 以太网接口</p>	<p>(1) 2 个 RS232/RS422/ RS485 接口 (2) 16DO、26DI (3) 4 计数器输入、 8PT100 输入 (4) 4AI、4AI、4AO (5) 2 个热敏电阻输入</p>	<p>(1) 2 个 RS232/RS422/ RS485 接口 (2) 16DO、26DI (3) 4 计数器输入、 8PT100 输入 (4) 4AI、4AI、4AO (5) 2 个热敏电阻输入</p>

(1) 采集机舱内振动开关、油位、压差、磨损、发电机温度及接触器、继电器和传感器的反馈等开关量信号；采集并处理叶轮转速、发电机转速、风速风向、温度、振动等脉冲、模拟量信号由通信模块转为光纤通信经塔筒到达塔基控制柜，经中央处理器处理后，由光纤通信返回机舱，控制各传感器执行元器件输出。

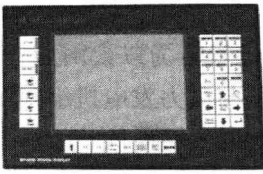


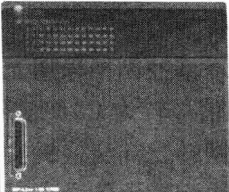
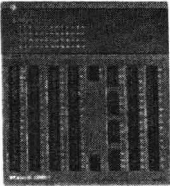
(2) 通过集电环对变桨系统供电，建立通信和开关量信号交互，发送 EFC (Emergency Feather Command) 和 Bypass (Bypass feather limit switch 91°) 信号控制变桨系统的紧急顺桨和复位。通过与变桨系统的 RS-485 通信，控制桨距角变化，实现功率控制。

塔基控制柜模块配置见表 1-2。塔基控制柜的主要工作任务如下所述。

(1) 控制器的处理模块位于塔基控制柜，主要完成数据采集及输入、输出信号处理；逻辑功能判定；对外围执行机构发出控制指令；与机舱控制柜进行通信，接收机舱信号，返回控制信号；与变频器 CAN 通信，通过控制转子电流实现有功无功调节，使风力发电机组变速恒频运行；与风电场中央监控系统通信，交互信息。

(2) 对变频器、变桨系统、液压系统状况、偏航系统状况、润滑系统状况、齿轮箱状况、及机组关键设备的温度和环境温度等作监控；变频器和变桨系统的耦合控制，实现了机组变速恒频运行、有功无功调节、并网和制动、偏航自动对风、自动解缆、发电机和主轴的自动润滑、主要部件的除湿加热和散热器的开停。

表 1-2 塔基控制柜模块配置

				
触摸屏	电源、通信模块	CPU 模块	电量测量模块	输入输出模块
(1) Linux 操作系统 (2) 以太网接口	(1) 两路模块 供电输出 (2) 冗余光纤 通信接口 (3) 以太网接 口	(1) 存储、处 理数据 (2) 2 串口、1 以太网接口 (3) 编程环境 C、IEC61131-3 (4) 网络服务 器	(1) 测量三相电压、 电流, 计算有功功率、 无功功率、功率因数 (2) 电网监控、发 电机保护	(1) 2 个 RS232/ RS422/RS485 接口 (2) 16DO、26DI (3) 4 计数器输 入、8PT100 输入 (4) 4AI、4AI、 4AO (5) 2 个热敏电阻 输入

(3) 对定子侧和转子侧的电压、电流测量,除了用于监控电压、电流、频率外,也用于统计发电量。发电机定子和外电网直连,转子通过集电环与变流器连接,通过塔基控制柜和变流器的 CAN 通信,调节发电机转矩,实现有功无功的动态调节。

(4) 通过和机舱相连的信号线,实现系统安全停机、紧急停机、安全链复位等功能。

在以上控制硬件的基础上,系统通过应用软件编程,实现如偏航、齿轮箱、发电机、主轴、制动系统、变距系统和变流系统等各大部件在不同工况下的协调控制以及在故障情况下的报警和保护。其中变距系统和变流系统都可看作独立的控制对象,虽然它们也有各自独立的控制系统,但我们只需与主控系统建立简单的通信,即可实现对它们的控制。

为提高风力发电机组运行的可靠性,可由一套独立的在线监测系统实现系统状态的监测和保护,监测齿轮箱、发电机、轴承、叶轮的受力和振动情况,避免主要部件的寿命折损和破坏,减少风力发电机组的维护成本。

主控系统和在线监测系统可通过 SCADA 软件实现异地远程监控,查看当前风力发电机组运行情况和历史运行记录,并提供相关统计分析信息。

## 练 习 题

1. 风力发电机组的控制技术包含了哪些内容,有什么特点?
2. 定桨恒速风力发电机组的控制系统主要解决了哪些关键技术问题,有什么特点?
3. 风力发电机组控制技术主要经历了哪几个阶段,取得了哪些进步?
4. 风力发电机组由哪几个主要部件构成,各起什么作用?
5. 控制系统由哪几部分构成,主要控制对象有哪些?
6. 根据风力发电机组变桨距运动规律,写出其运动特性的微分方程组。假设 1.5MW 风机参数表述如下:  $\beta$  为桨距角,  $I$  为叶片的转动惯量,  $B$  为阻尼系数,  $K$  为传动系统刚度系数,  $T_A$  为驱动扭矩,当系统加入控制力  $T_F = k_1\beta + k_2\dot{\beta}$ , 求微分方程组的解,并讨论系统的控制过程。

## 第二章 定桨恒速风力发电机组的控制

现代并网风力发电机组是在定桨恒速风力发电机组的基础上发展起来的。定桨恒速风力发电机组的控制技术已经包含了并网风力发电机组监测与控制技术的基本内容，主动失速控制、全桨变距控制和变速恒频控制都是建立在这一基础之上的。因此，对定桨恒速风力发电机组控制技术的研究是本章的基本内容。

### 第一节 定桨恒速风力发电机组的工作原理

#### 一、叶轮结构

定桨恒速风力发电机组的主要结构特点是桨叶与轮毂的连接是固定的，即当风速变化时，桨叶的迎风角度不能随之变化。这一特点给定桨恒速风力发电机组提出了几个必须解决的问题。一是当风速高于叶轮的设计点风速即额定风速时，桨叶必须能够自动地将功率限制在额定值附近，因为风力发电机组上所有材料的物理性能是有限度的，桨叶的这一特性被称为自动失速性能；二是运行中的风力发电机组在电网突然失电或其他紧急情况下，桨叶自身必须具备制动能力，使风力发电机组能够在大风情况下安全停机。

早期定桨恒速风力发电机组的叶轮并不具备制动能力，脱网时完全依靠安装在低速轴或高速轴上的机械制动装置通过摩擦制动，即通过摩擦力做功耗尽风力发电机组的旋转动能来实现制动。这对于数十千瓦的机组来说问题不大，但对于大型风力发电机组如果只采用摩擦制动，就会短时间在局部位置上产生巨大的热量，对机组的安全性和传动系统的结构强度产生严重的影响。1956年，丹麦工程师 Johannes Juul 针对定桨恒速风力发电机发明了紧急叶尖气动刹车。当风力机超速时，通过离心力的作用将叶尖气动阻尼板释放。为控制风力机转速提供了新的技术方案。20世纪80年代，桨叶开发商以此为基础完成了叶尖扰流器的设计并成功地应用在失速性桨叶上，解决了在高风速情况下的安全停机问题，使定桨恒速风力发电机组在相当长的时期内占据了主导地位，直到推出兆瓦级变速恒频风力发电机组。

#### 二、桨叶的失速调节原理

当气流流经上下翼面形状不同的叶片时，因凸面的弯曲而使气流加速，压力较低；凹面较平缓而使气流速度缓慢，压力较高，因而产生升力。桨叶的失速性能是指它在最大升力系数  $C_{l_{max}}$  附近的性能。一方面，当桨叶的安装角  $\beta$  不变，随着风速增加攻角  $i$  增大时，升力系数  $C_l$  线性增大；在接近  $C_{l_{max}}$  时，增大变缓；达到  $C_{l_{max}}$  后开始减小。另一方面，阻力系数  $C_d$  初期不断增大；在升力开始减小时， $C_d$  继续增大，这是由于气流在叶片上的分离区随攻角的增大而增大，分离区形成大的涡流，流动失去翼型效应，与未分离时相比，上下翼面压力差减小，致使阻力激增，升力减小，造成叶片失速，从而限制了功率的增加，如图 2-1 所示。

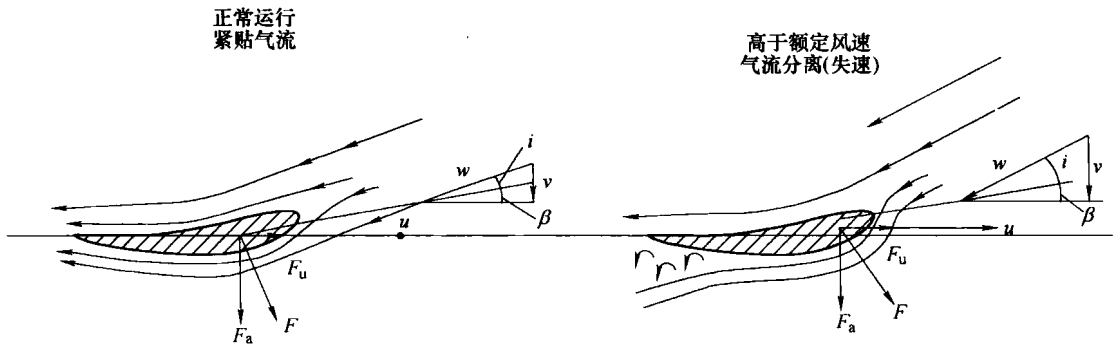


图 2-1 桨叶的失速原理

失速调节使叶片的攻角沿轴向由根部向叶尖逐渐减小，因而根部叶面先进入失速区，随风速增大，失速部分向叶尖处扩展，原先已失速的部分失速程度加深，未失速的部分逐渐进入失速区。失速部分使功率减少，未失速部分仍有功率增加，从而使输入功率保持在额定功率附近。

### 三、叶尖扰流器

由于风力发电机组叶轮具有巨大的转动惯量，如果叶轮自身不具备有效的制动能力，在高风速下要求脱网停机是不可想象的。早年的风力发电机组正是不能解决这一问题，导致灾难性的飞车事故不断发生。目前所有的定桨恒速风力发电机组均采用了叶尖扰流器的设计。叶尖扰流器的结构如图 2-2 所示。当风力发电机组正常运行时，在液压系统的作用下，叶尖扰流器与桨叶主体部分精密地合为一体，组成完整的桨叶。当风力发电机组需要脱网停机时，扰流器按控制指令释放并旋转  $80^\circ \sim 90^\circ$  形成阻尼板，由于叶尖部分处于距离旋转中心的最远点，整个叶片作为一个长的杠杆，使叶尖扰流器产生的气动阻力相当高，足以使风力发电机组迅速减速，这一过程即为桨叶空气动力制动。叶尖扰流器是定桨恒速风力发电机组的主要制动器，每次制动时都是它起主要作用。

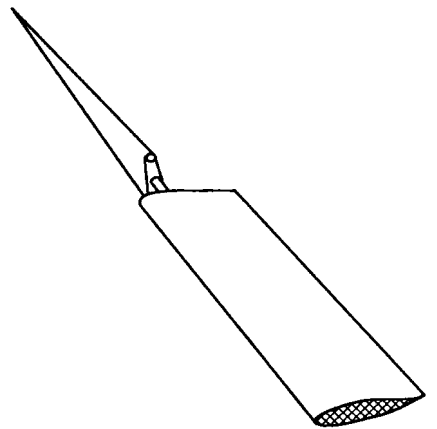


图 2-2 叶尖扰流器结构

在叶轮旋转时，作用在叶尖扰流器上的离心力和弹簧力都力图使叶尖扰流器脱离桨叶主体转动到制动位置，但由于液压力的存在而使它保持在工作位置；而液压力的释放，不论是控制系统的正常指令，还是液压系统的故障引起，都将导致叶尖扰流器展开而使叶轮停止运行。因此，空气动力制动是一种失效保护装置，它使整个风力发电机组的制动系统具有很高的可靠性。



## 四、双速发电机

定桨恒速风力发电机组还存在低风速时的效率问题。在整个运行风速范围 ( $3\text{m/s} > v > 25\text{m/s}$ ) 内由于气流对桨叶的攻角是在不断变化的, 如果风力发电机组的转速不能随风速的变化而调整, 这就必然要使叶轮在低风速时的效率降低 (但如果将最高效率点设置在低风速区, 则会使桨叶过早进入失速状态)。同时发电机本身也存在低负荷时的效率问题, 尽管目前用于风力发电机组的发电机已能设计得非常理想, 它们在  $P > 25\%$  额定功率范围内, 均有高于 90% 的效率, 但当  $P < 25\%$  额定功率时, 效率会急剧下降。为了解决低风速时的效率问题, 有一些定桨恒速风力发电机组采用双速发电机, 分别设计成 4 极和 6 极, 一般 6 极发电机的额定功率设计成 4 极发电机的  $1/4 \sim 1/5$ 。例如, 600kW 定桨恒速风力发电机组一般设计成 6 极 150kW 和 4 极 600kW, 750kW 风力发电机组设计成 6 极 200kW 和 4 极 750kW。这样, 当风力发电机组在低风速段运行时, 不仅桨叶具有较高的气动效率, 发电机的效率也能保持在较高水平。采用双速发电机的风力发电机组输出功率曲线如图 2-3 所示。从而使采用双速发电机的定桨恒速风力发电机组与变桨风力发电机组在进入额定功率前的功率曲线差别不大。

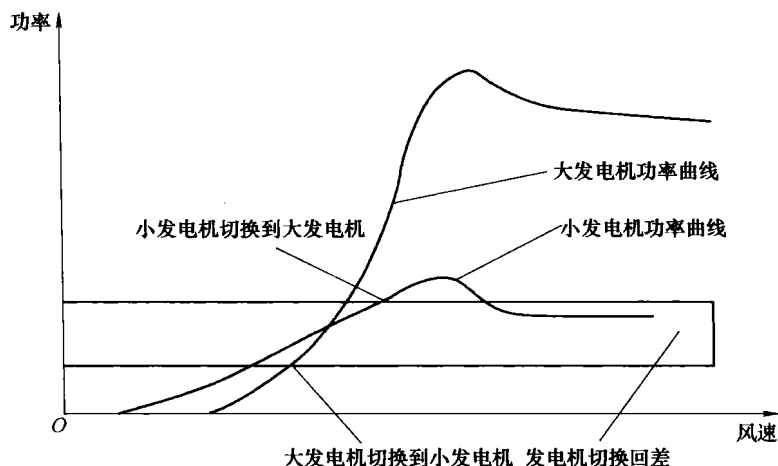


图 2-3 双速发电机功率曲线

## 五、功率输出

根据风能转换的原理, 风力发电机组的功率输出主要取决于风速。但除此以外, 气压、气温、海拔高度和气流扰动等因素也会显著影响风力发电机组的功率输出, 如图 2-4 所示。因为定桨距叶片的标准功率曲线是在空气的标准状态下计算出来的, 这时空气密度  $\rho = 1.225\text{kg/m}^3$ 。当气压与气温变化时,  $\rho$  会跟着变化, 一般当温度变化  $\pm 10^\circ\text{C}$  时, 相应的空气密度变化可达  $\pm 4\%$ 。而桨叶的失速性能只与风速有关, 只要达到了叶片气动外形所决定的失速调节风速, 不论是否满足输出功率, 桨叶的失速性能都要起作用, 影响功率输出。因此, 当气温升高时, 空气密度就会降低, 相应的功率输出就会减少; 反之, 功率输出就会增大。对于一台 750kW 的定桨恒速风力发电机组, 在冬季和夏季可能会出现 30 ~ 50kW, 甚至