

“十一五”国家重点图书出版规划项目
风力发电工程与应用丛书

风力发电测试技术

● 姚兴佳 等著



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

“十一五”国家重点图书出版规划项目
风力发电工程与应用丛书

《风力发电系统的设计、运行与维护》
►《风力发电测试技术》
《现代风力发电技术及工程应用》

风力发电技术国家重点实验室
国家风力发电工程技术中心

鼎力支持



策划编辑：张 剑
责任编辑：张 剑
封面设计：徐海燕



ISBN 978-7-121-13054-0



9 787121 130540 >

定价：69.00 元

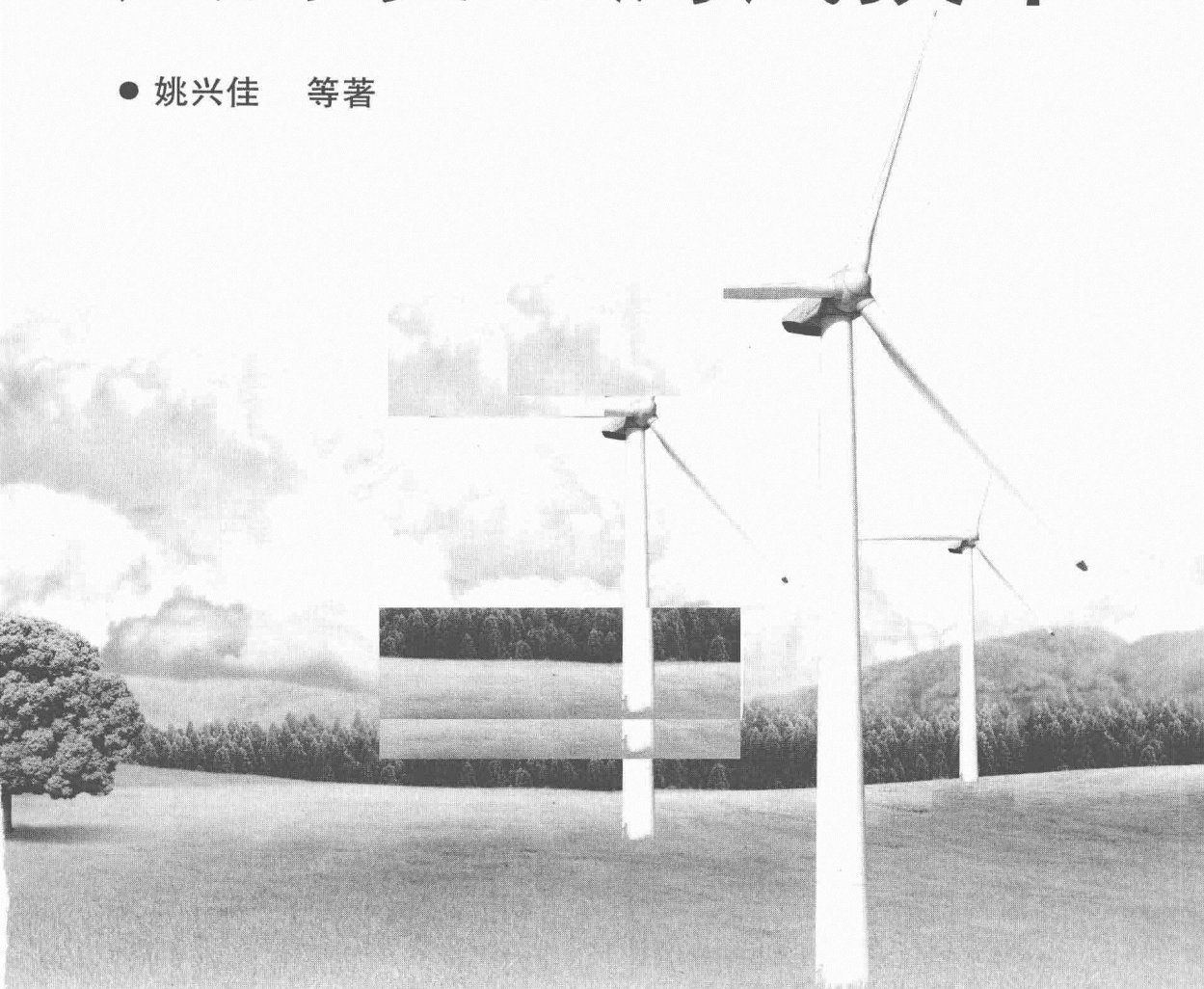
本书贴有激光防伪标志，凡没有防伪标志者，属盗版图书。

“十一五”国家重点图书出版规划项目

风力发电工程与应用丛书

风力发电测试技术

● 姚兴佳 等著



電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统介绍了风力发电测试技术的原理与测试方法,包括测量与测量误差基础知识,风力发电中各种基本物理量的测量技术,风力发电机组主要部件测试技术,振动与噪声测试技术,整机的安全保护功能、控制功能及运行性能测试技术等,最后简要介绍了风力发电机组的质量认证。本书在介绍风力发电测试技术的基本理论和测试方法的同时,力求向读者展现该领域的最新成果与发展动向,以启发读者在风力发电测试领域的研究和创新。

本书可供从事风力发电研究、生产和运行的技术人员阅读和参考,也可作为高等学校相关专业的教学用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

风力发电测试技术/姚兴佳等著. —北京:电子工业出版社, 2011.3

(风力发电工程与应用丛书)

ISBN 978-7-121-13054-0

I. ①风… II. ①姚… III. ①风力发电—测试技术 IV. ①TM614

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第038804号

责任编辑:张 剑

印 刷: 三河市鑫金马印装有限公司

装 订:

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本: 720×1 000 1/16 印张: 28.25 字数: 602 千字

印 次: 2011年3月第1次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 69.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

丛 书 序

近十年来，风力发电在世界范围内得到了持续高速发展，为应对全球气候变化作出了重要贡献。风力发电清洁能源的兴起已成为低碳经济的重要标志之一。

虽然我国的风力发电产业起步较晚，但近年来，在政府的大力倡导下，呈现了高速增长的态势，大有后来居上的趋势。风力发电是一项新兴的综合性学科，涉及广泛的技术领域，包括气象学、空气动力学、机械电子工程、电力电子技术等，从业的工程技术人员需要通过系统的学习和培训，才能胜任相关的技术工作。目前，由于产业发展速度较快，相关技术人才十分紧缺。

电子工业出版社组织国内风力发电专家编写了“风力发电工程与应用丛书”，内容包括了风电场的开发与建设，风力发电系统的设计、运行与维护，风力发电测试技术，现代风力发电技术及工程应用等，涉及内容广泛，可作为从事风力发电工作的各类技术人员的学习、培训教材，也可作为高等院校师生和相关工程技术人员参考用书。相信丛书的出版，能够对培养我国风力发电专业技术人才，促进我国风力发电持续健康发展发挥重要的作用。

中国工程院 院士
浙江大学 教授



序

能源问题一直是全球性问题，各国都在密切关注和探求未来能源的发展方向。2006年1月1日，中国颁布实施了《可再生能源法》，把开发利用可再生能源作为可持续发展战略的重要组成部分。

在可再生能源中，风力发电的发展很快，在技术上已经逐渐趋于成熟。在我国，风力发电更是得到了超常规、规模化的迅猛发展。然而，我国风力发电快速发展的主要标志还仅仅体现在风电场的装机容量上，倒机、火灾、飞车、振动等各类事故时有发生，机组额定功率年运行时间均值远低于2000小时，这些都充分暴露了我国风电发展面临整机及关键零部件测试技术相对落后的瓶颈问题。要使规模化发展的风力发电成为名副其实的替代能源、节能减排的生力军，还需要我们在风力发电测试技术研究、测试人才培养两个方面开展卓有成效的工作。

本书的出版实现了作者多年的夙愿，可以说是二十余年坚持自主创新的沈阳工业大学风能研发团队及其合作伙伴在教学、科研和生产实践中取得的大量科技成果的结晶，填补了国内、外风力发电领域在测试技术文献方面的一个空白。该书立意新颖、结构严谨、内容翔实，对风力发电技术中的基本物理量测试技术，主要部件测试技术，整机功能与性能测试技术，以及振动与噪声测试技术等作了较全面介绍。对于从事风力发电研究的企、事业单位科技工作者、高等院校师生，特别是从事风力发电测试工作的专业技术人员，本书无疑是一本系统学习风力发电测试技术的良师益友，也是一本可供随时查阅的技术手册。

风力发电是一个涉及多领域、多学科的系统工程，是一项惠及子孙后代的伟大事业，只有大家齐心协力，才能把这件事情真正办好。

中国工程院院士



2010年12月8日

前 言

近年来,随着煤炭、石油等化石燃料的日渐枯竭及气候变暖等环境问题的影响,可再生能源的开发利用越来越受到人们的重视。风能是可再生能源的重要形式之一。风能的主要利用方式是风力发电,即把风的动能转换成电能,然后再加以利用。在可再生能源领域,风力发电是技术上最成熟、最具规模化开发和商业化发展前景的分支领域。

截至 2009 年年底,全球风力发电总装机容量已经达到 157.899GW,并且以大约 30%的速度增长;我国累计装机容量也已跃过 20GW 大关,达到 25.8053GW,风电装机容量居世界第 2 位;2009 年当年,我国新增风电装机 10129 台,装机容量 13.8032GW,占全球新增风电装机的 1/3,超过美国排名全球第一。目前,我国已经基本掌握单机容量 1.5MW 以下大型风力发电设备的制造技术,消化吸收国外先进技术和自主研发的具有自主知识产权的 0.8~2.0MW 变速双馈风力发电机组及变速直驱风力发电机组已经开始规模化批量生产。2009 年,首批 3.0MW 功率等级的海上风力发电机组已经在上海、江浙等近海区域风电场投入运行,5.0 MW 风力发电机组也正在加速研制过程中,有望短期内取得突破性成果。在国家风力发电设备国产化政策的有力推动下,风力发电设备零部件制造水平也有了较大提高,具备了叶片、齿轮箱、发电机、控制器和变流器等关键部件的设计、制造能力。

与快速发展的风力发电技术和风电产业相比,我国的风力发电测试技术显得相对落后,这一点主要表现在风力发电机组整机、部件测试技术和运行性能测试技术水平还不能适应风力发电技术快速发展的需要。风力发电技术是涉及空气动力工程、机械工程、电气工程、信息及计算机工程、力学工程、电力电子变流技术等多种学科的综合技术,科技含量高,技术难度大;风力发电机组面对的是台风、雷电、潮湿、盐雾、酷热、高寒等各种恶劣的工作环境及严格的电网条件,运行工况复杂而多变。来自外部和内部的种种因素使风力发电机组的可利用率、风电转换效率及使用寿命受到很大影响,很多重大事故的发生,往往源于一个数据的错误或一种信息的疏忽,因此,如何实现对风力发电机组从零部件到整机的设计、制造,直至并网运行的全过程进行跟踪检测,成为提升风电设备质量、确保风电产业健康发展的重要环节之一。

风力发电测试技术是风力发电技术的重要组成部分,风力发电技术的发展离不开测试技术的进步,测试技术的进步又保证和促进了风力发电技术的发展。作者二十余年从事风力发电研发的实践有力地证明了这一点。因此,需要积极推动风力发电测试技术的研究和相关人才的培养,以便为我国风力发电的大规模开发和利用准备必要的技术和人才支持。本书作者就是在这样一种责任感的激励下策划并最终完成了本书的。

本书对风力发电测试技术作了较为系统的介绍,是作者在多年教学经验和科研、生产实践的基础上,综合已获得的“风轮功率输出模拟系统”、“风力发电机综合检测仪”、“台架式动平衡实验台”、“兆瓦级变速恒频风电机组测试系统与现场试验研究”等相关研究成果,并参考了大量文献资料和国家有关标准后精炼而成的。全书共分7章,第1章简要介绍有关测量和测量误差的基础知识;第2章介绍风力发电中一些基本物理量的测量,包括风参数的测量,基本电量和基本机械量的测量、谐波测量及温度测量等;第3章介绍风力发电机组主要部件的测试,包括风轮叶片、主传动装置、发电机、变流器及偏航、变桨距、制动等执行机构的测试;第4章重点介绍风力发电机组的噪声与振动测试,精辟的理论分析和丰富的应用实例是本章的一大亮点;第5章介绍风力发电机组的整机测试,首先介绍整机试验平台的原理、结构和功能,然后介绍整机的安全系统测试、控制系统测试和整机现场测试技术等;第6章介绍风力发电机组的运行性能测试,包括功率特性测试、电能质量测试和载荷测试等;第7章简要介绍有关风力发电机组质量认证的基本概念、主要内容、操作流程和检验规范等。本书在强调风力发电测试技术的基本原理和测试方法的同时,力求向读者展现风力发电测试技术的最新成果和发展动向,以启发读者在这一工作领域的研究与创新。

姚兴佳教授是本书的主要策划者、组织者和执笔人;唐德尧教授及其团队(包括曾承志、李合林、王晓立、王智、曾明军)完成了第4章;宣安光高级工程师完成了第3章的齿轮箱测试部分;张锦南高级工程师及其团队(包括王建新、郭辉、李东海)完成了第3章的风轮叶片测试部分;参加本书其他章节执笔的还有王益全教授、邢作霞副教授、单光坤副教授、王英博、宋筱文、刘颖明、王晓东、王士荣和井艳军等。由姚兴佳教授完成全书的审稿和定稿工作。

本书是以风力发电测试技术为主题而成书的首次尝试,是在沈阳工业大学风能技术研究所、北京唐智科技有限公司、上海玻璃钢研究院有限公司和杭州前进齿轮箱集团有限公司等单位及其相关人员的共同努力下完成的,本书的完成有赖于上述单位丰富的科研成果和生产实践经验。

东方汽轮机厂、沈阳华人风电科技有限公司、沈阳博鉴检测有限公司等单位为本书提供了资料、图片及咨询等方面的支持,在此一并表示感谢。

对于电子工业出版社及其相关人员在本书完成过程中所给予的指导和帮助谨致谢意。

在编写本书过程中所参考的主要著作和论文已列入书后的参考文献中,以便读者进一步查阅,对于这些文献的作者对本书的贡献,作者表示衷心感谢。

由于作者水平有限,书中缺点和错误在所难免,敬请读者批评指正。

姚兴佳
2010年8月

目 录

第 1 章 测量与测量误差基础	1
1.1 测量基础知识	1
1.1.1 测量与单位	1
1.1.2 国际单位制	2
1.1.3 测量仪表	4
1.2 测量误差基础	7
1.2.1 测量误差的来源与分类	7
1.2.2 测量误差的表示方法	8
1.2.3 有效数字	11
第 2 章 基本物理量的测量	12
2.1 风的测量	12
2.1.1 测风仪	12
2.1.2 测风的技术要求	17
2.1.3 测风方法	20
2.2 基本电量测量	24
2.2.1 仪用互感器	25
2.2.2 电量变送器	26
2.2.3 电压与电流的测量	31
2.2.4 电功率测量	35
2.2.5 功率因数和频率的测量	38
2.3 谐波的测量	41
2.3.1 谐波分析原理与应用	41
2.3.2 非正弦电量测量原理	47
2.3.3 谐波的测量	49
2.4 转速、应力和转矩的测量	51
2.4.1 转速的测量	51
2.4.2 应力的测量	54
2.4.3 转矩的测量	57
2.5 温度的测量	62
2.5.1 电阻法	64

2.5.2	埋置检温计法	65
2.5.3	温度计法	68
2.5.4	红外测温技术	69
2.5.5	数字温度传感器	71
第 3 章	主要部件测试	73
3.1	概述	73
3.2	风轮叶片测试	75
3.2.1	气动性能试验	75
3.2.2	固有特性试验	80
3.2.3	静力试验	82
3.2.4	疲劳试验	86
3.3	主传动装置测试	89
3.3.1	风力发电机组主传动装置的特点	89
3.3.2	齿轮箱测试技术	91
3.3.3	齿轮箱测试技术基础	96
3.3.4	齿轮箱测试实例	115
3.4	发电机测试	120
3.4.1	空载试验	120
3.4.2	温升试验	127
3.4.3	损耗与效率的测定	132
3.4.4	工作特性测试	137
3.5	执行机构测试	142
3.5.1	液压站测试	142
3.5.2	变桨距机构测试	144
3.5.3	偏航机构测试	147
3.5.4	制动器测试(高速轴刹车装置试验)	149
3.5.5	失速机构测试	150
3.6	变流器测试	151
3.6.1	引言	151
3.6.2	试验平台	154
3.6.3	试验内容与试验方法	155
第 4 章	风力发电机振动、冲击和噪声测试与故障诊断	158
4.1	概述	158

4.2	风力发电机噪声测试	161
4.2.1	风力发电机噪声产生机理及特征分析	161
4.2.2	风力发电机噪声及其基本测量方法	165
4.2.3	风力发电机噪声检测的标准	170
4.2.4	风力发电机组噪声测试方案的设计	172
4.3	风力发电机振动、冲击测试	173
4.3.1	振动、冲击、广义共振与共振解调	173
4.3.2	超宽频绝对振动、冲击与低频相对振动受感技术	176
4.3.3	风力发电机的振动测试与分析	194
4.3.4	风力发电机的冲击测试与故障诊断	273
第 5 章	整机测试	312
5.1	概述	312
5.1.1	整机结构	312
5.1.2	整机检验规则	313
5.1.3	整机测试的内容与方法	315
5.2	整机试验平台	317
5.2.1	用于完成型式检验的整机试验平台	318
5.2.2	用于完成出厂检验的整机试验平台	322
5.3	安全保护系统测试	326
5.3.1	在线监测系统测试	326
5.3.2	安全保护功能测试	330
5.4	控制系统测试	332
5.4.1	控制系统及其控制功能	332
5.4.2	控制功能测试	334
5.5	整机现场测试	336
5.5.1	静态测试	337
5.5.2	空转测试	352
5.5.3	并网测试	354
第 6 章	运行性能测试	356
6.1	概述	356
6.2	功率特性测试	359
6.2.1	功率特性	359
6.2.2	功率特性的测试	361
6.2.3	功率特性测试的数据处理	369

6.2.4	功率特性测试结果	371
6.3	电能质量测试	374
6.3.1	电压波动与闪变的测试	374
6.3.2	谐波的测试	386
6.3.3	其他电能质量参数的测试	390
6.4	风力发电机组载荷测试	391
6.4.1	风力发电机组的载荷	391
6.4.2	载荷的测试原理与方法	392
6.4.3	机械载荷的测试	397
6.4.4	载荷测试的标定	399
6.4.5	气象参数和机组运行参数的测量	401
6.4.6	载荷测试的数据处理	402
第 7 章	风力发电机组质量认证	408
7.1	概述	408
7.2	认证依据	409
7.2.1	引言	409
7.2.2	IEC 61400	409
7.2.3	德国劳氏船级社指南	410
7.2.4	我国的风力发电国家标准	410
7.2.5	其他	412
7.3	认证类型及内容	412
7.3.1	整机型式认证	413
7.3.2	风电场项目认证	421
7.3.3	部件认证	424
7.3.4	样机认证	426
7.3.5	德国劳氏船级社认证指南简介	426
7.4	主要认证及测试机构介绍	429
7.4.1	德国劳氏船级社	430
7.4.2	丹麦瑞索国家实验室	430
7.4.3	美国国家可再生能源实验室	431
7.4.4	荷兰能源研究中心	432
7.4.5	德国风能研究所	432
7.4.6	其他风力发电认证机构	433
参考文献		434

第 1 章 测量与测量误差基础

简单地说，测试技术就是测量与试验技术。风力发电测试技术就是风力发电机组中各种物理量的测量，以及零部件与整机的参数、功能及性能的测试技术。在对风力发电机组进行测试时，应严格贯彻和执行相关国家标准，按照国家标准所规定的测试条件和测试方法进行测试，以便对风力发电机组的零部件和整机的功能、性能及其安全性做出评价。风力发电是一种近年来才得到快速发展的新能源技术，与其设计、制造、控制等技术一样，风力发电测试技术也在发展中不断完善。测试技术的不断进步又反过来促进了风力发电技术的进一步发展。

参加测试的人员必须了解风力发电机组的结构与特性，具备有关测量与试验的基本知识和基本技能。本章将简要介绍有关测量和测量误差的基本知识。

1.1 测量基础知识

1.1.1 测量与单位

为了表示某物理量的数量，必须有一个与该物理量具有相同性质的标准量作为比较基准，这个标准量称为单位。求取某物理量是标准量单位的多少倍的操作称为测量。用于完成这种操作的装置称为测量器具（如仪器、仪表、量具等）。测量结果应由数值和单位两部分组成，没有单位的数值是没有物理意义的。

设被测量为 x ，单位量为 x_0 ，则测量结果的数值 A_x 为

$$A_x = \frac{x}{x_0} \quad (1-1)$$

式 (1-1) 称为测量的基本方程。显然，对于同一个被测量，若所选用的单位不同，测量结果的数值也不相同。

以最高的精确度和稳定性建立起来的专门用于规定、保持和复现某种物理量单位的特殊量具或仪器称为基准器，基准器一般保存在国际级的权威研究机构中。根据基准复现的量值制成的不同等级的标准量具或仪器称为标准器。电量标准器主要有标准电池、标准电阻器、标准电容器及频率标准等。电量标准器的精确度很高，但使用起来不太方便，工程应用中，往往采用标准电压、电流发生器或高精度的数字式多功能仪表来代替。指示式仪表校验时，也可以用比该仪表高出 1~2 个准确度等级以上的同类仪表作为校验用标准器。

确定电量单位的实验称为绝对测量。图 1-1 所示为利用电流天平进行电流绝对测量的示意图。当被测电流 I 流过线圈时，可动线圈产生向下的作用力 F ，用天平测量该力并求得电流 I 。

努力维护由绝对测量求出的电量单位作为标准器的准确性是每个国家的义务，各国之间也以这些基本单位作为各国之间比较的标准语言。

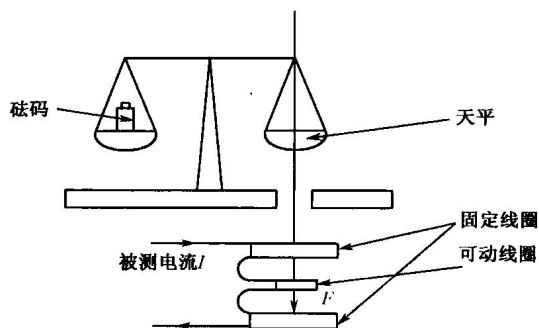


图 1-1 电流的绝对测量

1.1.2 国际单位制

测量单位的确定和统一是非常重要的。要使同一个物理量在不同的时间、地点测量时有相同的结果，必须采用统一的、固定不变的单位。世界各国大多以法律的形式来规定计量单位，国际上统一使用的单位制称为国际单位制（SI），国际单位制是世界各国在国际计量大会上协商确定的。

根据 1971 年国际计量大会的规定，国际单位制（SI）中有 7 个基本单位（参见表 1-1），2 个辅助单位（参见表 1-2）及 19 个具有专门名称的导出单位（参见表 1-3）。同时规定了以国际单位制为基准的用于构成十进倍数和分数单位的词头（参见表 1-4）。

表 1-1 国际单位制（SI）的基本单位

量的名称	单位名称	单位符号	定义	备注
长度	米	m	在 $1/299792458$ s 的时间内光在真空中传播的长度	1983 年修订
质量	千克（公斤）	kg	与国际千克原器相等的质量	1989 年定义
时间	秒	s	铯 133 两个超精细能级跃迁时所对应辐射的 9192631770 个周期的持续时间	1967 年修订
电流	安[培]	A	在间隔 1m 的两个无限长平行直导线内每米长度上产生 2×10^{-7} N 的力的电流	1948 年修订
热力学温度	开[尔文]	K	是水的三相点热力学温度的 $1/273.16$	1967 年修订
发光强度	坎[德拉]	cd	是光源在给定方向上的发光强度，该光源的 540×10^{12} Hz 单色辐射的辐射强度为 $1/683$ W/sr	1979 年修订
物质的量	摩[尔]	mol	系统中所包含物质量的基本单元数等于 0.012 kg 碳 12 所包含的原子数目	1971 年定义

表 1-2 国际单位制 (SI) 的辅助单位

量的名称	单位名称	单位符号	定义
[平面]角	弧度	rad	是一个圆内两个半径间的平面角, 这两个半径在该圆周上截取的弧长与半径相等
立体角	球面度	sr	是一个立体角, 其顶点位于球心, 其在球面上所截取的面积等于以球半径为边长的正方形的面积

表 1-3 国际单位制中具有专门名称的导出单位

量的名称	单位名称	单位符号	其他表示式
频率	赫[兹]	Hz	s^{-1}
力, 重力	牛[顿]	N	$kg \cdot m/s^2$
压力, 压强, 应力	帕[斯卡]	Pa	N/m^2
能[量], 功, 热量	焦[耳]	J	$N \cdot m$
功率, 辐[射能]通量	瓦[特]	W	J/s
电荷[量]	库[仑]	C	$A \cdot s$
电压, 电动势, 电位	伏[特]	V	W/A
电容	法[拉]	F	C/V
电阻	欧[姆]	Ω	V/A
电导	西[门子]	S	A/V
磁通[量]	韦[伯]	Wb	$V \cdot s$
磁通[量]密度, 磁感应强度	特[斯拉]	T	Wb/m^2
电感	亨[利]	H	Wb/A
摄氏温度	摄氏度	$^{\circ}C$	—
光通量	流[明]	lm	$cd \cdot sr$
[光]照度	勒[克斯]	lx	lm/m^2
放射性活度	贝可[勒尔]	Bq	s^{-1}
吸收剂量	戈[瑞]	Gy	J/kg
剂量当量	希[沃特]	Sv	J/s

表 1-4 用于构成十进倍数和分数单位的词头

单位的倍数	词 头	
	名 称	符 号
10^{18}	艾[可萨]	E
10^{15}	拍[它]	P
10^{12}	太[拉]	T
10^9	吉[咖]	G
10^6	兆	M
10^3	千	k
10^{-1}	分	d
10^{-2}	厘	c
10^{-3}	毫	m
10^{-6}	微	μ
10^{-9}	纳[诺]	n
10^{-12}	皮[可]	p
10^{-15}	飞[母托]	f
10^{-18}	阿[托]	a

1.1.3 测量仪表

1. 测量仪表的分类

根据测量原理及测量值表示方法的不同，测量仪表可分为模拟式和数字式两大类。模拟式仪表利用被测量产生力矩，驱动指针运动，使指针产生相应的位移或偏转相应的角度来指示被测量的大小，其优点是能够及时、简洁地反映被测物理量的大小关系，其缺点是因操作者的经验不足或疏忽等原因，容易引起测量误差。

数字式仪表则是首先利用传感器对被测量进行检测，由传感器将被测量（电量或非电量）转换成传感器输出的标准电信号（即 0~5V 电压信号或 0~20mA 电流信号等），然后将电信号（模拟量）转换成数字信号，并用计数器进行计数，再用数码管或液晶显示器等数字显示被测量，其构成框图如图 1-2 所示。数字式仪表的优点是精确度高，缺点是当被测物理量变化时，其测量值难以瞬时读取。在测量精度方面，数字式仪表相对模拟式仪表有着绝对的优势。数字式仪表在风力发电的整机测试和在线测试中得到了广泛应用。

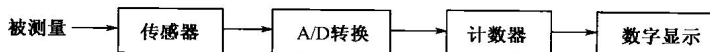


图 1-2 数字式仪表的构成

用指针的偏转来表示电量的模拟式仪表称为指示式电工仪表。指示式电工仪表在风力发电的零部件测试和整机测试中得到了广泛应用。指示式电工仪表可按工作原理、准确度等级、用途等进行分类。国家标准 GB776 规定,指示式电工仪表的准确度等级可分为 0.1、0.2、0.5、1.0、1.5、2.5、5.0 共 7 个等级。表 1-5 列出了指示式电工仪表按工作原理的分类。其中应用最为广泛的是电磁系和电动系电工仪表。电磁系仪表结构简单、体积小、价格便宜,主要安装在控制柜和控制盘面板上,用做供电线路或供电设备的电压、电流指示;电动系仪表准确度较高、价格较贵,主要用于电气设备(如发电机、电动机、变压器等)的型式试验或性能测试中。

表 1-5 指示式电工仪表的分类与应用

分 类	符 号	最高准确度等级	应用电路	应 用 举 例
磁电系		0.1	直流	电压表、电流表、电阻表、转速表、温度计、检流表、照度表磁通计
电磁系		0.1	交(直)流	电压表、电流表、转速表
电动系		0.1	交(直)流	功率表、频率表、电压表、电流表、功率因数表
静电系		0.1	交(直)流	电压表
感应系		0.5	交流	电能表
热电系		0.2	交(直)流	电压表、电流表、功率表
整流系		1.0	交流	电压表、电流表、频率表

2. 指示式电工仪表的结构

指示式电工仪表主要由以下 4 部分构成: ① 使指针偏转的驱动部分; ② 平衡驱动力矩的控制部分; ③ 抑制指针振荡的阻尼部分; ④ 数据读取部分。下面以指示式电工仪表中精确度和灵敏度较高, 结构也比较简单的动圈式电流表为例加以说明。

图 1-3 所示为动圈式电流表的结构。在永磁体 N、S 上装有两个电工纯铁制成的极靴 P, 可动线圈 C 绕制在矩形骨架上, 骨架上、下分别装有转轴、轴承和游丝, 以及与转轴成直角的可以自由转动的指针等。