



风力发电职业培训教材

Vocational Training Materials for Wind Farm

第四分册

# 风力发电机组检修与维护

Wind Turbine Maintenance



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



风力发电职业培训教材

Vocational Training Materials for Wind Farm

第四分册

# 风力发电机组检修与维护

Wind Turbine Maintenance

龙源电力集团股份有限公司 编



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

为了提高风电从业人员的职业技能水平,特编写了本套《风力发电职业培训教材》该教材共分四个分册,《风力发电基础理论》《风电场安全管理》《风电场生产运行》《风力发电机组检修与维护》。

《风电机组检修与维护》分册共分12章,前3章主要讲述设备检修基础理论、风电场检修管理、检修基本技能及工器具,后9章分部件讲解风电机组主要部件(变桨系统、叶片、主轴及齿轮箱、发电机、控制系统、变流器、液压与刹车系统、偏航系统、塔架与基础)的功能原理、检查与测试、定期维护、典型故障处理等内容。

本套教材内容丰富,图文并茂,条理清晰,实用性强,编写人员是有丰富经验的行业专家。本套书可作为风电行业新入职员工、安全管理人员、风电场运行检修人员技能培训教材使用,也可供职业院校风电专业师生及从事风电行业的科研、技术人员自学使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

风力发电职业培训教材.第4分册,风力发电机组检修与维护/龙源电力集团股份有限公司编.一北京:中国电力出版社,2016.3

ISBN 978-7-5123-8976-2

I. ①风… II. ①龙… III. ①风力发电-职业培训-教材②风力发电机-机组-检修-职业培训-教材 IV. ①TM614②TM315

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第039920号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

\*

2016年3月第一版 2016年3月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 20.5印张 461千字

印数0001—3000册 定价108.00元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

## 编辑委员会

主任委员	李恩仪	黄群		
常务副主任委员兼主编	张宝全			
副主任委员兼副主编	吴金城	杜杰	张敏	岳俊红
	朱炬兵	李力怀	夏晖	孙海鸿
秘书长	孙海鸿 (兼)			
委员	(按姓氏笔画排序)			
	王博	王贺	王延峰	邓杰
	叶杭冶	田文奇	冯江哲	冯宝平
	司松	朱耀春	朱辉玉	任淮辉
	庄加利	刘钟洪	刘智益	刘瑞华
	刘锦如	孙浩	江建军	汤涛祺
	李晓雪	李闯	肖剑	吴声声
	何灏	何文雄	宋中波	张冬平
	张海涛	张悦超	张国珍	陈刚
	陈默	范晓旭	和军梁	周世东
	郎斌斌	赵小明	杨天宇	荣兴汉
	宣安光	胡宾	胡鹏	胥佳
	徐海华	郭慧东	唐元祥	陶钢正
	黄晓杰	曹建忠	寇福平	曾繁礼
	薛蕾	魏亮		

## 序 言

随着以煤炭、石油为主的一次能源日渐匮乏，全球气候变暖、环境污染等问题的不断加剧，人类生存环境面临严峻挑战。有鉴于此，风力发电作为绿色清洁能源的主要代表，已成为世界各主要国家一致的选择，在全球范围内得到了大规模开发。龙源电力集团股份有限公司是中国国电集团公司所属，以风力发电为主的新能源发电集团，经过多年的快速发展，2015年6月底以1457万千瓦的风电装机规模，成为世界第一大风电运营商。

在风电持续十多年的开发建设中，风力发电设备日渐大型化，机型结构和控制策略日新月异，设备运行、检修和管理标准、规程逐步完善，并网技术初成系统。然而风电场地处偏远、环境恶劣、机型复杂、设备众多，人员分散且作业面广。随着装机容量和出质保机组数量的逐年增加，安全生产局面日趋严峻，如何加速培养成熟可靠的运行、检修人员，成为龙源电力乃至整个行业亟待解决的问题。

为强化风电运行和检修岗位人员岗位培训，龙源电力组织专业技术人员和专家学者，历时两年半，三易其稿，自主编著完成了《风力发电职业培训教材》。该套教材分为《风电场安全管理》《风力发电基础理论》《风电场生产运行》《风力发电机组检修与维护》四册，凝聚了龙源电力多年来在风电前期测风选址、基建工艺流程、安全生产管理以及科学技术创新的成果和积淀，填补了业内空白！

教材的主要特点有：一是突出行业特色，内容紧跟行业最新的政策、标准、规程及新设备、新技术、新知识、新工艺；二是立足岗位技能教育，贴合现场生产实际，结合风电运行、检修具体工作，图文并茂地介绍相应的知识和技能，在广度和深度上适用于各级岗位人员；三是文字通俗易懂，内容详略得当，具有一定的科普性。教材对其他机电类书籍已包含的内容不作详细介绍，不涉及深层次的风电研发、设计理论和推导，便于运检人员阅读和自学。

龙源电力作为国内风电界的领跑者，全球第一大风电运营商，国际一流的新能源上市公司，肩负着节能减排、开拓发展、育人成才的重任，上岗培训教材和其他系列培训教材的陆续出版将为风电行业的开发经营、人才培养起到积极作用！

编 者



## 前言

随着国际社会能源紧缺压力的不断增大、环境污染和气候变化等问题日益严峻，风能作为一种洁净、无污染、可再生的绿色能源得到了国际社会的高度重视。风电技术日益成熟，风电装机容量不断增大，并网性能不断改善，发电效率不断提高，风电产业在全球能源产业中脱颖而出。

我国于2006年正式实施《可再生能源法》，加大了对风电事业支持的力度，以前所未有的规模和速度迅速发展。在吸收国外风电发展经验的基础上，国内也逐渐积累了一些风电开发、建设、运营和管理的经验，培养和造就了一支具有丰富经验的风电专业技术与管理的队伍。龙源电力集团股份有限公司（龙源电力）致力于可再生能源开发、投资、建设和经营，在发展规模和专业技术水平方面处于国内风电行业领跑地位。

为适应风电迅速发展的形势需要，实施“人才强企”战略，增强企业核心竞争能力，培养一支高素质的人才队伍，满足风电场运行、维护、检修技术人员需求，龙源电力组织编写本套培训教材。参与本书编写的人员除了有扎实的风电理论基础知识的专家外，还有长期从事风电机组调试、检修、维护工作，具有丰富现场实践经验的工程技术人员，其宝贵的工作经验都融入到了本书中。本书的编写力求内容系统、完整，详尽地介绍了风电场运行维护技术，注重理论与实践的结合。本书适合作为风电职业技术培训教材使用，或作为从事风力发电运行、检修的技术人员自学之用，也可供作为风电有关设计和科研人员学习参考。希望本书的出版能对中国风电产业技术人才的培养提供支持，对推动中国风电事业的发展产生积极的作用。

本书由龙源电力组织编写，龙源（北京）风电工程技术有限公司承担具体编写任务；第1章由胥佳、刘瑞华编写；第2章由陶钢正编写；第3章由周世东编写；第4章由胡鹏编写；第5章由刘智益、荣兴汉编写；第6章由任淮辉编写；第7章由赵小明、田文奇、冯江哲编写；第8章由朱耀春、张悦超编写；第9章由张悦超、刘钟淇编写；第10章由王博编写；第11章由王博、肖剑编写；第12章由曹建忠编写。全书由岳俊红、陶钢正统稿并负责整体编排。

在本书的编写过程中，得到了龙源电力人力资源部朱炬兵、胡宾、汤涛祺等同志的大力支持和帮助，多次组织专家审阅校核，才得以如期完成编写任务。龙源电力技术中心吴金城、杜杰和龙源电力安生部夏晖、张海涛、薛蕾以及龙源（北京）风电工程有限公

司宋中波提供了部分珍贵的参考资料，龙源电力所属蒙东、甘肃、新疆、辽宁、河北公司提出了宝贵的修改意见，在此一并表示诚挚感谢。

本书力求准确、详尽，由于作者水平所限和时间仓促，在编写过程中难免有不当和疏漏之处，希望读者不吝指正。

编 者

# 目 录

序 言  
前 言

<b>1</b>	<b>检修基础理论</b> .....	1
1.1	设备维修简介 .....	1
1.1.1	检修的定义 .....	1
1.1.2	设备检修管理理论 .....	3
1.1.3	设备检修原则 .....	4
1.2	设备检修分类 .....	5
1.2.1	设备检修的方式 .....	5
1.2.2	检修方式及类型的选择 .....	7
1.3	设备可靠性指标 .....	9
1.4	设备故障理论 .....	11
1.4.1	磨损理论 .....	11
1.4.2	故障规律 .....	12
1.4.3	故障分类 .....	13
1.4.4	故障分析方法 .....	14
	思考题 .....	19
<b>2</b>	<b>风电场检修管理</b> .....	21
2.1	概述 .....	21
2.1.1	检修管理的目的及意义 .....	21
2.1.2	检修管理的主要内容 .....	22
2.1.3	检修管理的基本原则和要求 .....	22
2.2	风电场运检模式 .....	23
2.2.1	运检管理模式的分类 .....	23
2.2.2	日常检修工作流程 .....	25



2.2.3	检修管理基本指标	30
2.3	检修计划	30
2.3.1	检修计划的分类	30
2.3.2	检修计划的制订与编写	30
2.4	检修实施	34
2.4.1	检修基础管理	34
2.4.2	开工前准备	34
2.4.3	安全措施和要求	34
2.4.4	进度控制	36
2.5	检修质量	36
2.5.1	总体要求	36
2.5.2	质量目标	37
2.5.3	验收	37
2.6	检修总结	38
2.6.1	检修评价与总结	38
2.6.2	资料归档	38
	思考题	38

### 3 检修基本技能及工器具

3.1	概述	39
3.1.1	检修基本技能	39
3.1.2	检修工器具	39
3.1.3	表述方式	39
3.2	电工基础	39
3.2.1	电工识图	39
3.2.2	低压电控柜安装规范	47
3.3	机械装配基础	50
3.3.1	机械装配图识图	50
3.3.2	公差配合	52
3.3.3	拆卸清洗	53
3.3.4	装配作业基本要求	56
3.3.5	过盈连接的装配	56
3.4	螺纹紧固件的安装与拆卸	60
3.4.1	螺纹紧固件的类型	60
3.4.2	螺纹紧固件的预紧	61
3.4.3	螺纹紧固件的拆卸	63
3.5	轴对中	66
3.5.1	轴对中的基本概念	66

3.5.2	轴对中方法	66
3.5.3	激光对中	67
3.6	起重作业	70
3.6.1	起重作业基础知识	70
3.6.2	起重机械	70
3.6.3	起重指挥人员使用的手势信号	72
3.6.4	常用吊索具	74
3.7	检修典型工具	83
3.7.1	扭矩扳手	83
3.7.2	电工仪表	85
3.7.3	电动工具	87
3.7.4	常用量具及仪表	89
	思考题	90

## 4 变桨系统维护与检修

4.1	概述	91
4.1.1	变桨系统的功能	91
4.1.2	变桨系统的结构原理	91
4.1.3	变桨系统的常见故障类型	95
4.2	变桨系统的检查与测试	96
4.2.1	变桨系统气动刹车性能测试	96
4.2.2	液压变桨系统位置校正检测	99
4.3	变桨系统的定期维护	101
4.3.1	电动变桨系统定期维护项目	101
4.3.2	液压变桨系统定期维护项目	102
4.3.3	变桨轴承的润滑	103
4.3.4	变桨液压缸的维护	104
4.3.5	滑环的维护	105
4.3.6	后备动力的测试与维护	105
4.3.7	皮带传动变桨系统测试与维护	106
4.4	变桨系统的典型故障处理	107
4.4.1	通信中断故障	107
4.4.2	变桨不到位故障	109
4.4.3	液压变桨油泵故障	109
4.4.4	电动变桨驱动机构故障	110
4.4.5	后备电源故障	111
4.5	变桨系统的大修	112
4.5.1	更换轮毂与叶片	112

4.5.2 更换变桨轴承 .....	117
4.5.3 更换液压变桨轴及三角架 .....	119
思考题 .....	120

## 5 叶片的维护与检修 .....

5.1 概述 .....	121
5.1.1 叶片的功能 .....	121
5.1.2 叶片的结构原理 .....	121
5.1.3 叶片的常见损伤类型 .....	121
5.2 叶片的检查与检测 .....	123
5.2.1 目视法 .....	123
5.2.2 敲击法 .....	123
5.2.3 叶片检查辅助方式 .....	124
5.2.4 无损检测 .....	125
5.2.5 叶片监测系统 .....	127
5.3 叶片的定期维护 .....	128
5.3.1 日常检查 .....	129
5.3.2 接近式检查 .....	130
5.3.3 检查周期 .....	131
5.4 叶片典型问题及案例 .....	131
5.4.1 叶片横向裂纹 .....	131
5.4.2 叶片折断事故 I .....	135
5.4.3 叶片折断事故 II .....	136
5.5 叶片的维修 .....	140
5.5.1 手工层压法 .....	140
5.5.2 真空施压法 .....	141
思考题 .....	141

## 6 主轴及齿轮箱维护与检修 .....

6.1 概述 .....	142
6.2 主轴和齿轮箱主要故障类型 .....	144
6.2.1 主轴及支持系统的主要故障类型 .....	144
6.2.2 齿轮箱总成的主要故障类型 .....	145
6.3 检查和测试 .....	153
6.3.1 主轴轴承的检查 .....	153
6.3.2 齿轮箱本体的检查 .....	153
6.3.3 齿轮箱弹性支撑的检查 .....	153
6.3.4 齿轮箱润滑及冷却系统的检查 .....	153

6.3.5	高强紧固件的检查 .....	154
6.3.6	主轴和齿轮箱的状态监测 .....	154
6.3.7	主轴和齿轮箱金属部件的缺陷检测 .....	154
6.4	定期维护 .....	154
6.4.1	主轴轴承的定期维护 .....	154
6.4.2	齿轮箱本体的定期维护 .....	156
6.4.3	齿轮箱润滑及冷却系统的定期维护 .....	156
6.5	典型故障处理 .....	157
6.5.1	主轴轴承的故障处理 .....	157
6.5.2	齿轮箱本体损伤与故障处理 .....	157
6.5.3	齿轮箱润滑及冷却系统故障处理 .....	160
6.5.4	主轴和齿轮箱的连接螺栓断裂故障处理 .....	161
6.6	设备大修 .....	161
6.6.1	主轴和齿轮箱更换及大修 .....	161
6.6.2	齿轮箱高速轴大修及更换 .....	163
6.6.3	齿轮箱弹性支撑大修及更换 .....	164
6.6.4	齿轮箱润滑及冷却系统大修及更换 .....	165
	思考题 .....	167

## **7** 发电机维护与检修 .....

7.1	概述 .....	168
7.1.1	发电机的功能 .....	168
7.1.2	发电机原理及类型 .....	168
7.1.3	常见故障类型 .....	170
7.2	检查与测试 .....	171
7.2.1	鼠笼式异步发电机 .....	171
7.2.2	双馈异步发电机 .....	174
7.2.3	永磁同步发电机 .....	177
7.3	定期维护 .....	179
7.3.1	通用维护项目 .....	179
7.3.2	各类机组维护清单 .....	179
7.3.3	注意事项 .....	181
7.4	典型故障处理 .....	181
7.4.1	转子轴颈磨损及处理方法 .....	182
7.4.2	转子扫膛故障 .....	182
7.4.3	轴承轴电流腐蚀及更换 .....	183
7.5	发电机大修 .....	188
7.5.1	发电机整体更换过程 .....	188

7.5.2 发电机出厂试验 .....	191
思考题 .....	193

## 8 控制系统维护与检修 .....

8.1 概述 .....	194
8.1.1 控制系统功能 .....	194
8.1.2 控制系统原理 .....	194
8.1.3 故障类型 .....	203
8.2 检查与测试 .....	204
8.2.1 通信检测 .....	204
8.2.2 安全链检测 .....	204
8.2.3 后备电源检测 .....	205
8.2.4 控制器状态检测 .....	205
8.2.5 传感器测试 .....	205
8.2.6 通风与加热测试 .....	206
8.3 定期维护 .....	206
8.3.1 柜体检查 .....	206
8.3.2 空气滤网检查 .....	206
8.3.3 温控系统检查 .....	207
8.3.4 接地防雷系统检查 .....	207
8.3.5 安全链检查 .....	207
8.3.6 PLC 软件版本检查 .....	208
8.3.7 电气连接检查 .....	208
8.3.8 UPS 检查 .....	208
8.3.9 风轮锁检查 .....	208
8.4 典型故障处理 .....	208
8.4.1 远程通信中断 .....	208
8.4.2 控制系统总线故障 .....	209
8.4.3 安全链无法复位 .....	211
8.4.4 温度高故障 .....	211
8.4.5 转速比较故障 .....	212
思考题 .....	213

## 9 变流器维护与检修 .....

9.1 概述 .....	214
9.1.1 基本概念 .....	214
9.1.2 变流器功能 .....	215
9.1.3 变流器原理 .....	216

9.1.4	风电机组风电机组故障类型 .....	217
9.2	检查与测试 .....	218
9.2.1	冷却系统测试 .....	218
9.2.2	IGBT 检测 .....	219
9.2.3	预充电测试 .....	220
9.2.4	极性测试 .....	222
9.2.5	Crowbar 测试 .....	223
9.2.6	UPS 测试 .....	224
9.2.7	断路器吸合测试 .....	224
9.3	定期维护 .....	225
9.3.1	维护注意事项 .....	225
9.3.2	空气滤网的定期维护 .....	225
9.3.3	功率电缆的定期维护 .....	226
9.3.4	电路板的定期维护 .....	226
9.3.5	散热器的定期维护 .....	227
9.3.6	电容器的定期维护 .....	227
9.3.7	UPS 电源的定期维护 .....	227
9.3.8	断路器的定期维护 .....	227
9.4	典型故障处理 .....	227
9.4.1	变流器转子过电流 .....	227
9.4.2	变流器过温 .....	229
9.4.3	Crowbar 故障 .....	230
9.4.4	预充电故障 .....	230
9.4.5	并网接触器闭合后跳开 .....	232
9.4.6	网侧三相电流不平衡 .....	233
	思考题 .....	235

## **10** 液压与刹车系统维护与检修 .....

10.1	概述 .....	236
10.1.1	液压系统功能简介 .....	236
10.1.2	液压系统原理 .....	237
10.1.3	液压系统常见故障类型 .....	239
10.1.4	刹车系统功能简介 .....	240
10.1.5	刹车系统原理 .....	240
10.1.6	刹车系统常见故障类型 .....	241
10.2	检查与测试 .....	242
10.2.1	常用故障诊断方法 .....	242
10.2.2	蓄能器检测 .....	245



10.2.3	液压系统压力检测 .....	246
10.2.4	液压油检测 .....	246
10.2.5	机械制动钳检测 .....	247
10.3	定期维护 .....	248
10.3.1	液压系统的定期维护 .....	248
10.3.2	刹车系统的定期维护 .....	249
10.3.3	重要部件的维护 .....	250
10.4	典型故障处理 .....	251
10.4.1	液压系统泄漏 .....	251
10.4.2	液压系统打压频繁 .....	253
10.4.3	液压系统压力低 .....	253
10.4.4	刹车间隙调整 .....	254
10.5	刹车盘更换 .....	255
10.5.1	拆卸刹车盘与制动器 .....	255
10.5.2	安装刹车盘与制动器 .....	256
	思考题 .....	258
<b>11</b>	<b>偏航系统维护与检修 .....</b>	<b>259</b>
11.1	概述 .....	259
11.1.1	偏航系统功能 .....	259
11.1.2	偏航系统工作原理 .....	259
11.1.3	偏航系统常见故障类型 .....	262
11.2	检查与测试 .....	263
11.2.1	风向标风速仪检测 .....	263
11.2.2	偏航传感器检测 .....	266
11.2.3	偏航电机检测 .....	270
11.3	定期维护 .....	272
11.3.1	定期维护项目 .....	272
11.3.2	偏航系统润滑脂量 .....	273
11.3.3	偏航减速机维护 .....	273
11.3.4	偏航制动装置维护 .....	274
11.4	典型故障处理 .....	281
11.4.1	偏航阻尼铜销磨损故障 .....	281
11.4.2	偏航传感器故障 .....	284
11.5	大修 .....	285
11.5.1	偏航减速器更换 .....	285
11.5.2	偏航轴承更换 .....	287
	思考题 .....	288

<b>12 塔架与基础</b> .....	289
12.1 概述 .....	289
12.1.1 基础的作用与分类 .....	289
12.1.2 塔架的作用和分类 .....	290
12.2 塔架及基础的检查与测试 .....	291
12.2.1 不均匀沉降观察 .....	291
12.2.2 基础环的水平度 .....	293
12.2.3 垂直度检查 .....	293
12.2.4 钢筋腐蚀检测 .....	294
12.2.5 焊缝的检查 .....	295
12.2.6 盐雾腐蚀试验 .....	296
12.2.7 螺栓性能试验 .....	297
12.3 定检项目 .....	297
12.4 塔架检修工艺 .....	300
12.4.1 塔架连接螺栓的更换 .....	300
12.4.2 塔架焊缝缺陷的返修 .....	302
12.4.3 塔架油漆修补方案 .....	304
思考题 .....	306
<b>参考文献</b> .....	307

# 检修基础理论

## 1.1 设备维修简介

维修是对设备进行维护和修理的简称。本书中的维护是指为保持设备良好工作状态所做的所有工作，包括清扫、检查、润滑、紧固、调整及校正等；修理是指恢复设备设计功能状态所做的所有工作，包括检查、故障诊断、故障消除、故障消除后的测试以及全面翻修（小修、中修、大修）和替换等。因此，维修是为了保持和恢复设备良好工作状态而进行的活动。

维修是伴随着蒸汽机等大型工业设备的使用而出现的。随着生产的发展，人们对维修的认识也在不断地深化。最初认为，维修是为了排除设备故障及预防故障的发生；后来认为，维修是设备状态正常和安全运行的保障。

随着自动化程度的不断提高，生产对维修的依赖性也不断增大。维修能提高设备的可用性、完好率和效率，并且延长设备的使用寿命。维修已成为保障企业生产能力的重要组成部分。维修成本是固定资产的生产力得以维持的必要投资，是电力工业和其他工业别无选择的基本生产投入，并且同样能创造经济效益。

20世纪50年代以前的维修，基本上属于一门操作技艺，缺乏系统的理论。当时的机器大多数采用皮带、齿轮传动。由于设备简单，可以凭眼睛看、耳朵听、手摸等直观判断或通过师傅带徒弟传授经验的办法来排除故障。随着生产的发展，出现流水线生产，为使生产不致中断，美国首先实行了预防性的定期维护，我国从第一个五年计划开始实行定期维护方式。

总体来说维修的发展过程可划分为事后维修、预防维修、改善维修三种。随着计算机技术在中企业中的应用的发展，维修领域也发生了重大变化，出现了智能维修等新方法。

### 1.1.1 检修的定义

检修和维修是设备检修管理经常用到的名称，在不同的行业对其有不同的理解：一般认为维修是对设备进行维护和修理的简称；检修是对设备进行检验和维修的简称。也有人认为维修和检修都包括维护、检查和修理；但检修是主动行为，偏重于预防性的维护、检查和修理；维修是被动行为，偏重于故障性解决的维护、检查和修理。维修多见于教材，检修多见于标准和规范。由于现在推行主动的预防性维护、检查和修理，因此本书采用检修表述，包括设备维护、检查和修理，下面分别介绍这三者的定义：