

新能源 消纳调控技术

宁夏电力调度控制中心 国家电网有限公司西北分部
国网宁夏电力有限公司电力科学研究院 **编著**



黄河出版传媒集团
阳光出版社

新能源消纳 调控技术

宁夏电力调度控制中心 国家电网有限公司西北分部
国网宁夏电力有限公司电力科学研究院

编著



黄河出版传媒集团
阳光出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

新能源消纳调控技术 / 宁夏电力调度控制中心, 国家电网有限公司西北分部, 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院编著. -- 银川: 阳光出版社, 2021.6
ISBN 978-7-5525-5817-3

I. ①新… II. ①宁… ②国… ③国… III. ①新能源-发电-研究 IV. ①TM61

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第054807号

XINNENGYUAN
XIAONA TIAOKONG JISHU
新能源消纳调控技术

宁夏电力调度控制中心
国家电网有限公司西北分部
国网宁夏电力有限公司电力科学研究院 编著

责任编辑 马 晖
封面设计 赵 倩
责任印制 岳建宁



黄河出版传媒集团 出版发行
阳光出版社

出 版 人 薛文斌
地 址 宁夏银川市北京东路139号出版大厦 (750001)
网 址 <http://www.ygchbs.com>
网上书店 <http://shop129132959.taobao.com>
电子信箱 yangguangchubanshe@163.com
邮购电话 0951-5014139
经 销 全国新华书店
印刷装订 宁夏银报智能印刷科技有限公司
印刷委托书号 (宁) 0020317

开 本 787mm × 1092mm 1/16
印 张 14.5
字 数 300千字
版 次 2021年8月第1版
印 次 2021年8月第1次印刷
书 号 ISBN 978-7-5525-5817-3
定 价 60.00元

版权所有 翻印必究

编委会

审核组

主 任：蒙金有

副 主 任：宁 波 蔡 乾 钟海亮

编写组

主 编：朱建军

副 主 编：王文倬 王 运 孙小湘 马 军

编写成员：蒙 飞 陈海东 卢 峰 李江鹏

宋 乐 李宏强 张丽娜 李 怡

刘 刚 高 刚 冯 元 朱仔新

王 鑫 孙 阳 刘一峰 白 鹭

高任龙 党佳伟 李 辉 张 杰

崔永琪 雷兴会 牟文杰 申丽圆

任 磊 常 鹏 赵 磊 张静忠

钟当书 李 桐 王 勇 李金东

孙 原 杨 宏 杨 龙 田 坤

徐建忠 王 庆 李 涛 田 波

杨 波 秦建翔 高海洋 李 峰

前 言

新能源高效消纳是世界公认的系统性技术难题。宁夏作为国家级新能源综合示范区,肩负着新能源高效消纳综合技术创新的重要使命。随着示范区的建设,大规模、高密度、高比例新能源密集直流群送端系统逐步形成,新能源不确定性、波动性及弱支撑性、弱抗扰性的不利影响更加凸显,消纳形势愈加严峻。受气候、地理环境及系统、负荷特性的制约,宁夏新能源高效消纳在源网荷侧面临四大技术难题:①宁夏地处复杂气候环境,局地混沌特性强,新能源功率波动大,提升功率预测精度优化消纳空间难;②宁夏新能源场站多处荒漠偏远地区,监测数据规模大、质量差,状态信息与设备异常关联关系复杂,故障预判手段不足,提升设备可用率减少场站侧弃电难;③宁夏高比例新能源密集接入,常规电源频率/电压调节资源严重不足,而新能源支撑能力弱,协调联动机理复杂,实现新能源场站主动控制减少电网侧弃电难;④宁夏多直流外送负荷约束复杂,本地负荷特性单一,实现区内外负荷响应拓展新能源消纳空间难。

为解决上述难题,本书从新能源高精度功率预测技术、电压/频率主动支撑技术、多直流联络线联合新能源消纳评估技术等三个方面进行编写。全书共分为九章,第一章为新能源高精度功率预测技术,揭示了不同天气过程的稳定性波动规律和混沌强度特征,提出了基于稳定性规律校准和实时四维资料同化的资源集合预报方法;第二章为新能源基础数据修复技术,提出了基于机群划分的风电场理论发电功率还原技术;第三章为新能源主动支撑技术,提出了考虑单机运行范围和电压分布特性的新能源场站主动电压控制策略;第四章为调度控制系统自动发电控制技术,介绍了宁夏电网自动发电控制技术的主要功能和系统建设及实现,提出了多控制目标的新能源场站有功控制技术;第五章为新能源快速频率响应技术,提出了“场站-发电单元”两级式协调联动的主动频率控制策略及多源梯次协同的高比例新能源电力系统调频参数优化方法,介绍了大电网静态频率扰动试验方法;第六章为新能源消纳直流运行控制技术,提出了考虑直流互动的日前发电计划优化模型及策略;第七章为暂态安全稳定紧急控制技术,提出了直流紧急功率支

援与同步电源强励协调的紧急控制方法及动态跟踪暂态功角弱稳定模式演化的紧急控制策略优化搜索方法,建立了适用于高比例新能源电力系统的安全综合防御体系;第八章为新能源短期与实时消纳能力评估技术,提出了基于电力平衡约束的新能源消纳能力综合评估方法及考虑新能源消纳的直流联络线日前功率曲线优化方法,实现新能源消纳能力的快速评估;第九章为新能源中长期消纳能力评估技术,提出了基于电力系统承载力指标的新能源装机规划方法及基于非时序模型的新能源消纳能力评估方法,建立直流外送模式下的新能源消纳分析体系。

本书编写过程中,除本著作的主要编写单位以外,中国电力科学研究院有限公司、国网电力科学研究院有限公司、国网浙江电力有限公司、清华大学、上海交通大学、北方民族大学、南瑞集团公司等单位的学者和专家给予了很大的支持和帮助,在此一并表示感谢。本书可为高等学校在校学生、各级调控机构和新能源场站从业人员等提供新能源调度专业知识,也可为电力行业其他专业乃至社会各界人士了解电网新能源调控运行知识提供参考。

编者

2021年6月1日

目 录

第 1 章 新能源高精度功率预测技术	(1)
1.1 宁夏地区新能源资源波动特性分析	(1)
1.1.1 宁夏风资源波动规律分析	(1)
1.1.2 资源时空统计规律	(3)
1.1.3 资源的时空相关性研究	(7)
1.2 适合宁夏地形和气候特点的集合数值天气预报技术研究	(11)
1.2.1 基于空间特征的天气类型划分方法	(12)
1.2.2 宁夏区域及物理参数化方案选取	(14)
1.2.3 实时四维资料同化技术	(15)
1.3 基于天气类型划分的新能源功率预测技术研究	(18)
1.3.1 宁夏风过程的划分	(18)
1.3.2 分天气类型的新能源功率预测方法的基本思路	(22)
1.3.3 风电功率预测方法	(22)
1.3.4 风电场短期预测模型的建立	(24)
1.4 本章小结	(25)
第 2 章 新能源基础数据修复技术	(27)
2.1 新能源基础数据处理及修复技术	(27)
2.1.1 光伏电站数据异常识别及修复技术	(27)
2.2 基于机群划分的风电场理论发电功率还原技术	(38)
2.2.1 数据说明及算法流程	(39)
2.2.2 异常数据的辨识	(39)
2.2.3 共线性检验与机群划分	(44)

2.2.4	机群理论功率计算	(46)
2.3	本章小结	(49)
第3章	新能源主动支撑技术	(50)
3.1	新能源场站频率支撑技术	(50)
3.1.1	新能源有功调节特性分析	(50)
3.1.2	新能源场站有功控制策略	(57)
3.1.3	新能源电站智能有功控制系统架构	(58)
3.2	新能源场站电压支撑技术	(62)
3.2.1	新能源电站无功调节特性分析	(62)
3.2.2	新能源电站无功控制策略	(65)
3.2.3	新能源电站无功控制系统架构	(70)
3.3	本章小结	(74)
第4章	调度控制系统自动发电控制技术	(75)
4.1	新能源场站有功控制特性分析	(75)
4.1.1	新能源并网对运行控制的影响	(75)
4.1.2	新能源场站有功控制特性	(77)
4.2	新能源场站实时发电与常规电源频率协调控制技术	(80)
4.2.1	多时间尺度一体化协调控制策略	(80)
4.2.2	新能源实时计划与常规 AGC 协调控制策略	(81)
4.3	多控制目标的新能源场站有功控制技术	(83)
4.3.1	新能源场站的统一建模	(83)
4.3.2	新能源 AGC 控制对象	(84)
4.3.3	新能源场站控制模式	(85)
4.3.4	新能源 AGC 的多目标控制	(86)
4.3.5	新能源 AGC 与常规 AGC 协调控制	(90)
4.4	省地协调控制技术	(92)
4.4.1	总体架构	(92)
4.4.2	省地数据交互	(92)

4.4.3	地调系统新能源控制	(92)
4.5	市场环境下新能源自动发电控制技术	(94)
4.5.1	市场环境下控制模型设计	(94)
4.5.2	市场环境下自动发电控制策略	(94)
4.5.3	市场环境下新能源输电断面的安全约束控制策略	(95)
4.5.4	市场环境下控制组自动切换策略	(96)
4.6	新能源场站调节性能在线分析及评价方法	(96)
4.6.1	控制精度与时段合格	(96)
4.6.2	调节速率	(98)
4.7	本章小结	(99)
第 5 章	新能源快速频率响应技术	(99)
5.1	基于新能源电站快频响应的西北电网频率特性分析	(99)
5.1.1	西北电网运行方式介绍	(100)
5.1.2	电网频率特性仿真分析	(101)
5.2	适应于电网快速频率响应的新能源电站控制策略及应用	(102)
5.2.1	风电场参与电网快速频率响应控制策略及应用	(102)
5.2.2	光伏电站参与电网快速频率响应控制策略及应用	(108)
5.3	新能源电站快频响应性能实证技术研究及应用	(115)
5.3.1	新能源电站快速频率响应性能入网试验方法	(115)
5.3.2	实例分析	(120)
5.4	基于多调频资源协调控制的西北电网快速频率响应参数配置方法	(127)
5.4.1	西北电网新能源快速频率要求	(127)
5.4.2	西北电网快速频率控制需求分析	(128)
5.4.3	西北电网新能源参与电网快速频率响应仿真分析	(129)
5.4.4	西北送端大电网多调频资源协调控制参数设置方案	(131)
5.5	本章小结	(133)
第 6 章	新能源消纳直流运行控制技术	(134)
6.1	多目标问题优化求解方法介绍	(134)

6.2	直流受端电网接纳能力分析方法	(135)
6.2.1	优化目标	(136)
6.2.2	约束条件	(136)
6.3	送端电网考虑直流互动的日前发电计划优化方法	(138)
6.3.1	直流计划调整约束模型	(138)
6.3.2	间歇式能源与常规能源协调优化模型	(142)
6.4	计及直流互动的送端电网日前发电计划协调优化模型	(144)
6.4.1	优化目标	(144)
6.4.2	约束条件	(145)
6.5	本章小结	(149)
第7章	暂态安全稳定紧急控制技术	(150)
7.1	直流紧急功率支援与同步电源强励协调的紧急控制	(150)
7.1.1	直流输电系统紧急功率支援电压限制因素分析	(150)
7.1.2	机组强励与紧急功率支援策略的制定	(162)
7.1.3	机组强励与直流紧急功率支援协调具体实施方案	(164)
7.2	兼顾首摆稳定性与功率振荡恢复速度的紧急控制策略优化搜索	(168)
7.2.1	暂态功角弱稳定模式及其识别方法	(168)
7.2.2	紧急控制导致弱稳定模式演化为主导失稳模式的机理	(170)
7.2.3	暂态功角稳定协调紧急控制数学模型	(172)
7.2.4	基于弱稳定模式辨识的紧急控制策略搜索方法	(173)
7.3	本章小结	(175)
第8章	新能源短期与实时消纳能力评估技术	(176)
8.1	促进新能源消纳的直流联络线日前功率曲线优化	(176)
8.1.1	直流联络线功率计划模型	(176)
8.1.2	考虑直流外送的发电计划优化模型	(179)
8.2	基于统计学特征的新能源纳入电网备用研究	(180)
8.2.1	新能源纳入备用对电网运行的影响	(181)
8.2.2	新能源统计学特征研究	(183)

8.2.3 基于统计学特征的新能源备用方案	(186)
8.3 基于电力平衡约束的新能源消纳综合评估方法	(189)
8.3.1 多约束下的综合评估方法	(189)
8.3.2 消纳能力评估	(192)
8.4 本章小结	(195)
第9章 新能源中长期消纳能力评估技术	(196)
9.1 基于电力系统承载力指标的新能源装机规划方法	(196)
9.1.1 能源出力统计学分析	(196)
9.1.2 承载能力指标与新能源装机规划方法	(201)
9.1.3 新能源装机影响因素分析	(206)
9.2 基于非时序模型的新能源消纳能力评估方法	(207)
9.2.1 新能源消纳时序仿真模型	(208)
9.2.2 新能源消纳能力的非时序评估方法	(209)
9.3 中长期尺度下的直流外送影响量化分析	(213)
9.3.1 考虑外送的新能源消纳理论分析模型	(214)
9.3.2 直流外送模式对新能源消纳的影响	(217)
9.4 本章小结	(221)
参考文献	(222)

第 1 章 新能源高精度功率预测技术

1.1 宁夏地区新能源资源波动特性分析

宁夏地处温带季风性气候和温带大陆性气候的交汇地带,兼具高原、台地、山地、平原、戈壁等复合型地形,使得宁夏地区新能源资源预测难度大,造成宁夏新能源功率预测偏差大。认清宁夏地区地形和气候特征对新能源资源预测误差的作用机理,并将资源波动规律应用于改进集合数值天气预报模式,是提高宁夏地区新能源资源预报精度的切实可行方案。在提高资源预报准确度的基础上,采用深度学习网络,综合挖掘和利用资源时空关联特性和新能源波动统计规律,构建预报资源和其他有效特征信息与电力的深层非线性映射模型,可有效提高宁夏新能源发电功率的预测精度。

1.1.1 宁夏风资源波动规律分析

风能资源的波动规律可通过年平均有效风功率密度、风速频谱规律、风能资源周期性等体现。

(1) 年平均有效风功率密度

风功率密度是气流在单位时间内垂直通过单位截面积的风能。风功率密度是从能量角度上对风能资源富集程度的表征。考虑到风速值都是离散形式的,近似地给出设定时段的平均风功率密度计算方法:

$$E = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \rho v_i^3 \quad (1-1)$$

式中, E 为平均风功率密度, W/m^2 ; ρ 为空气密度, kg/m^3 ; n 表示在设定时段内的记录数; v_i^3 为第 i 个水平风速。

空气密度可以作为海拔高度和温度的函数,按照下式计算估计值:

$$\rho = \frac{353.05}{T} e^{-0.034 \frac{Z}{T}} \quad (1-2)$$

式中, T 为气温, 单位 K; Z 为海拔高度, 单位 m。

从年时间尺度上, 给出年平均有效风功率密度的表达式:

$$\bar{E}_y = \frac{1}{12} \sum_{m=1}^{12} \bar{E}_{M,m} \quad (1-3)$$

(2) 风速频谱规律

风速的分布情况, 关系到风能的估算和利用。核密度估计方法不利用有关数据分布的先验知识, 对数据分布不附加任何假定, 是一种从数据样本本身出发研究数据分布特征的方法, 因而本章结合风速频率分布图、频率分布直方图以及核密度(KDE)曲线对风频分布特性进行刻画。

对同一风电场分析不同年份的风速频谱规律, 如图 1-1 给出了宁夏麻黄山第一风电场的分析结果。可以发现, 虽然各年份的风速频谱分布都基本符合威布尔分布, 但是峰值和数据偏差情况都有较为明显的差异。说明对中长期尺度的调度问题, 如果直接按照历史数据作为决策依据, 可能导致较为严重的偏差。

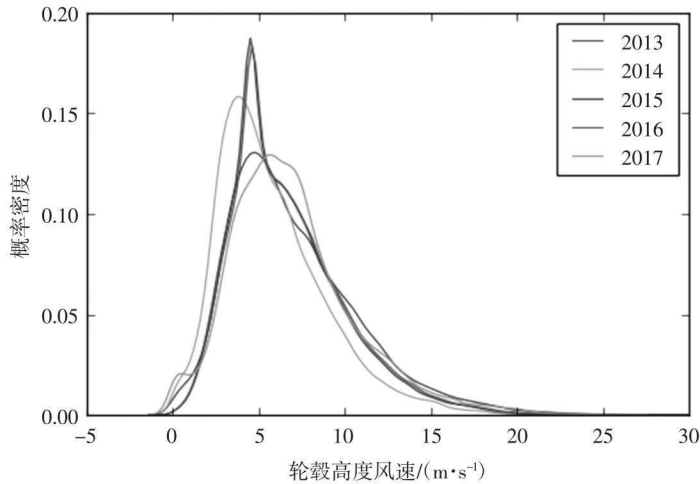


图 1-1 宁夏麻黄山第一风电场 2013—2017 年风速概率密度曲线

(3) 风能资源周期性

风能资源周期性分析主要包括风资源的年际变化、年变化和日变化等。分析风速在不同周期下的变化特征, 对分析风资源波动的时间特性有极其重要的意义。

分析风资源时间变化特性时最重要的一个环节就是寻找并分析风速变化的周期, 气象上通常用来分析周期的方法主要包含滤波、线性回归等统计方法, 以及小波分析的方法。小波分析方法, 是一种源于 Fourier 变换的分析时间序列能量的局部变化的数学方

法。Fourier 变换的优点是能够给出时间序列中包含的频率成分。但变换之后使时间序列失去了时间信息,不能告诉人们在某段时间内发生了什么。为了克服 Fourier 变换的缺点,加窗 Fourier 变换把时间序列变换为时间和频率的二维函数。它能够提供时间序列在某个时间段和某个频率范围的信息。但仍存在不足,即对所有的频率成分,所取的时间窗的大小都相同。小波变换继承了加窗 Fourier 变换的思想,提出了变化的时间窗,当需要精确的低频信息时,采用长的时间窗,当需要精确的高频信息,采用短的时间窗。因此在时、频域都具有更强的表征信号局部特征的能力。小波变换用的不是时间-频率域,而是时间-尺度域。尺度越大,采用越大的时间窗;尺度越小,采用越短的时间窗,即尺度与频率成反比。

小波分析中用得最多的另一个指标是振幅的平方,即小波能量谱,为了便于比较,小波能量谱也需要进行归一化。可以推导,能量谱的期望值等于序列 x_n 的期望值的 N 倍。对于白噪声系列, x_n 的期望值为 σ^2/N ,能量谱的期望为 σ^2 (σ^2 为方差)。故采用小波能量谱 $|W_n(s)|^2/\sigma^2$ 的归一化方法,其意义也就是相对于白噪声的能量量级,一般通过强能量富集的尺度来判断序列的周期。

小波分析用影响锥(COI)来划分受数据首尾效应影响区和免受影响区,定义为每个尺度 s 的能量的自相关的 e 倍时间(对 Morlet 小波, e 为 1.414 s)。这个 e 的选取基于能量谱在数据首尾将以 e^{-2} 下降。

1.1.2 资源时空统计规律

(1)资源时间分布模型

首先对一年的风速数据进行概率密度函数拟合。由于 15 min 的风速数据属于高频时间序列数据,在研究密度函数时噪声过大,所以考虑对一年的每日平均风速数据进行概率密度函数拟合。

图 1-2 为宁夏贺兰山第四风电场 2015 年 10 m 测风塔的每日平均风速的直方图。可以发现图像呈现右偏(即频率最高点偏左)。在常见的概率分布中,对数正态分布、Gamma 分布和 Weibull 分布都呈现出密度函数右偏的特征。

采用对数正态分布、Gamma 分布和 Weibull 分布等三种有右偏性质的概率密度参数分布,对宁夏贺兰山第四风电场 2015 年测风塔 10 m 高度处的每日平均风速进行概率密度函数拟合。拟合模型结果如表 1-1(参数估计值):

图 1-3 分别从不同的角度比较了三种概率密度函数拟合的好坏。其中红色代表 Weibull 分布,绿色代表对数正态分布,蓝色代表 Gamma 分布。第一张图对理论概率密度

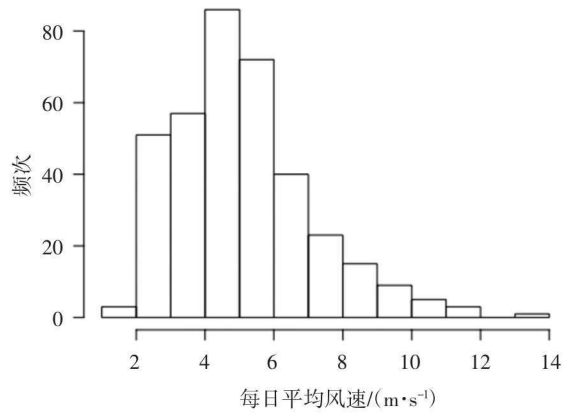


图 1-2 测风塔的每日平均风速的直方图

表 1-1 风速概率分布参数拟合结果

对数正态分布	Meanlog=1.55	Sdlog=0.37
Gamma 分布	Shape=7.17	Rate=1.40
Weibull 分布	Shape=2.72	Scale=5.72

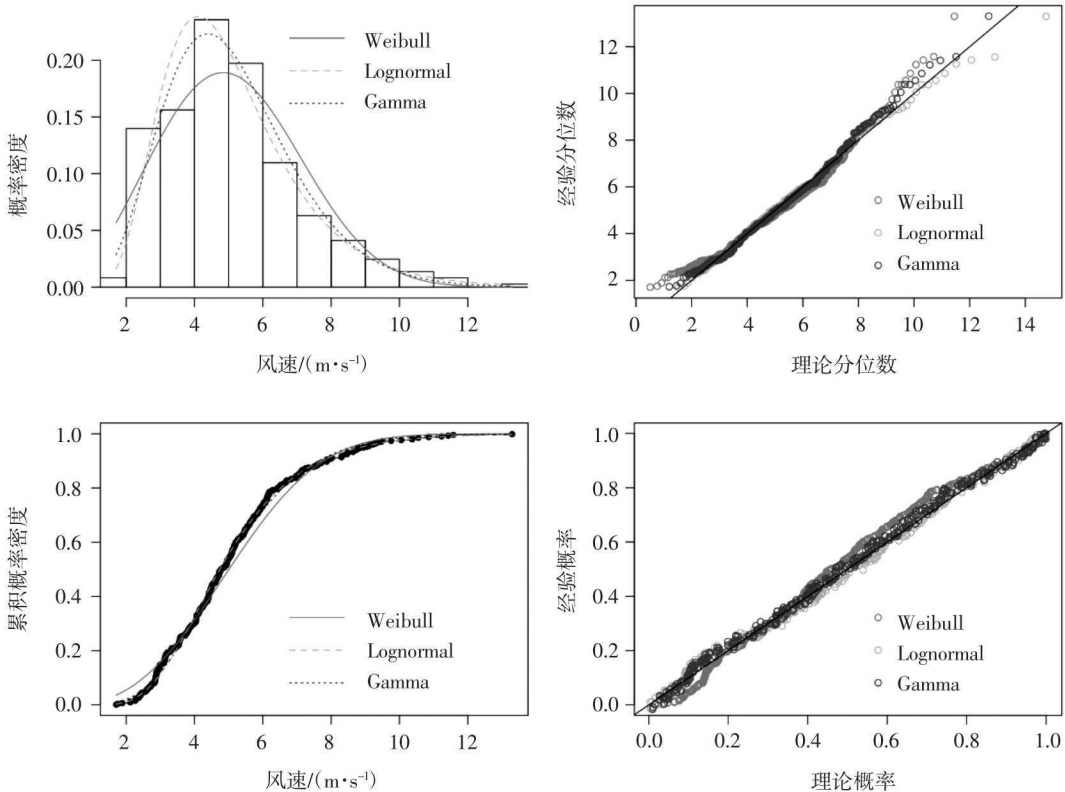


图 1-3 三种概率密度函数拟合比较

函数的图像和拟合的密度函数的图像进行了比较,如果拟合的密度函数和直方图越接近则拟合效果越好。第二张图是 Q-Q plot,当拟合的结果落在 45° 直线上,此时拟合效果最好。第三张图是从概率分布函数图像的角度进行了比较。第四张图是 P-P plot,类似第二张 Q-Q plot,同样是拟合结果落在 45° 直线上时拟合效果最好。从拟合结果看,对数正态分布和 Gamma 分布的拟合结果较好,Weibull 分布拟合的结果相比稍差。但总体上看,三种概率密度分布都可以很好地拟合宁夏贺兰山第四风电场 2015 年的每日平均风速数据。

上面是从图像直观的角度对拟合的概率密度函数效果进行了分析。接下来,从更加严谨的数学角度,对拟合的概率密度函数进行拟合优度检验。分别采用卡方检验、Kolmogorov-Smirnov 检验和 Cramer-von Mises 检验对风速概率分布的拟合结果进行检验,经过计算,三个拟合的概率密度函数都通过了拟合优度检验,结果如表 1-2 所示。这表明三种概率密度函数都可以对 2015 年宁夏贺兰山第四风电场 10 m 测风塔的每日平均风速进行很好的建模。

表 1-2 拟合优度检验

	卡方检验	Kolmogorov-Smirnov 检验	Cramer-von Mises 检验
对数正态分布	通过	通过	通过
Gamma 分布	通过	通过	通过
Weibull 分布	通过	通过	通过

对 2016 年和 2017 年宁夏贺兰山第四风电场 10 m 测风塔的每日平均风速进行拟合,来测试宁夏贺兰山第四风电场的风力资源在时间分布上是否均匀,以及三种概率密度函数拟合不同年份风速数据时的稳健性。

2016 年和 2017 年计算的模型参数估计结果如表 1-3 和表 1-4 所示。

表 1-3 2016 年计算模型参数估计结果

对数正态分布	Meanlog=1.39	Sdlog=0.40
Gamma 分布	Shape=6.20	Rate=1.41
Weibull 分布	Shape=2.58	Scale=4.96

表 1-4 2017 年计算模型参数估计结果

对数正态分布	Meanlog=1.21	Sdlog=0.42
Gamma 分布	Shape=6.11	Rate=1.67
Weibull 分布	Shape=2.53	Scale=4.10

相应的 2016 年、2017 年拟合效果如图 1-4 和图 1-5 所示。

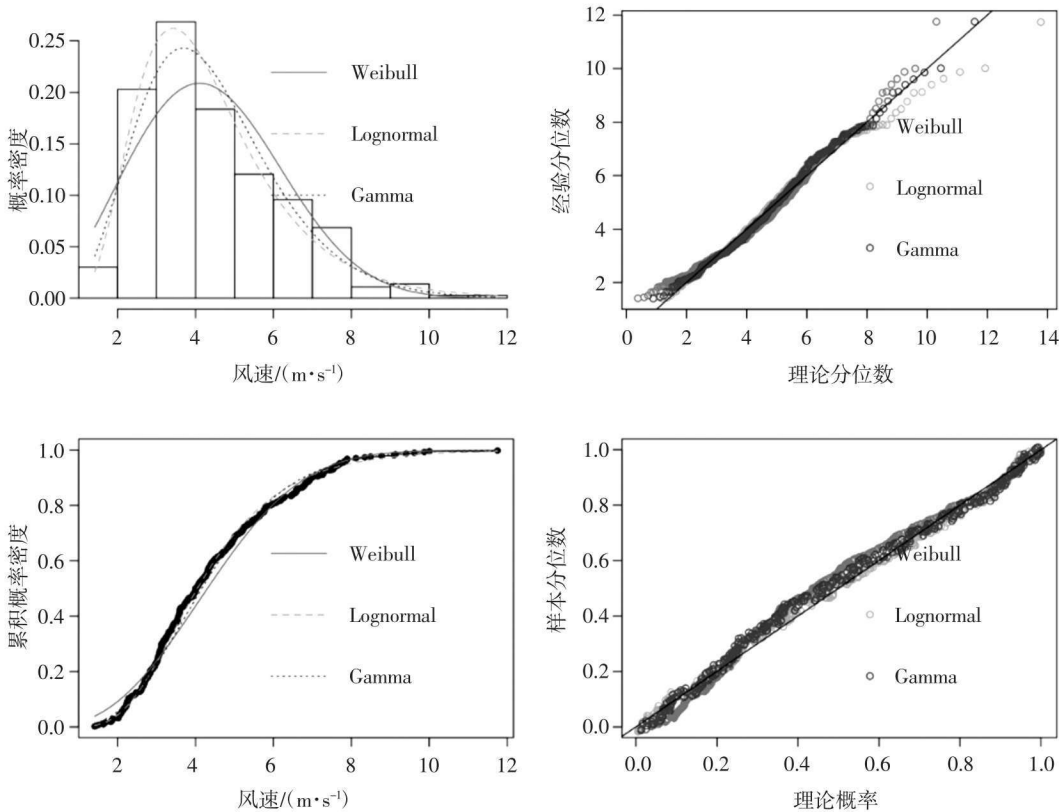


图 1-4 2016 年拟合效果图

以上拟合结果都通过了拟合优度检验。从上述结果看,对数正态分布、Gamma 分布、Weibull 分布对宁夏贺兰山第四风电场 2015—2017 年的 10 m 测风塔每日平均风速数据建模效果很好,并且同一密度函数模型在不同年份间参数变化不大,这表明宁夏风力资源在不同年份的分布比较均匀,同时模型在时间上表现出了稳健性。

由于西北地区的风况复杂,尽管对于日平均风速来说,对数正态分布、Gamma 分布和 Weibull 分布等单分布概率密度可以较好地估计风速和风能的概率密度,对于 15min/次记录的数据来说,由于数据波动性较大,单分布概率密度估计的效果未必会很好,为解决这个问题,提出使用混合 Weibull 分布模型来估计风速和风能的概率密度。混合 Weibull 分布通过将不同 Weibull 分布进行加权,从而获得更为精确的概率密度估计。

(2) 资源空间分布模型

研究不同省份间的风力资源分布是否存在差异。以甘肃省中节能昌马大坝风电场 2015—2017 年每日平均风速数据为例,计算三种概率分布模型拟合模型的参数,并与宁