

# 风电功率组合预测技术研究综述

丁乃千<sup>1,2</sup> 陈正洪<sup>3</sup>

(1 南京信息工程大学, 南京 210044; 2 恩施州气象局, 恩施 445000; 3 湖北省气象服务中心, 武汉 430074)

**摘要:** 20世纪80年代, 风电功率预测技术的研究工作就已经开始, 随着研究的深入, 预测方法越来越多, 预测精度也不断提高。而在全球风电产业迅猛发展的今天, 以单一方法为主的早期预测系统, 逐渐不能满足现代行业的需求, 组合预测作为一种全新的预测技术慢慢出现于各国研究人员的工作中。通过国内外大量的实际应用, 我们发现把多种预测方法进行加权组合, 预测精度相比单一的预测方法有了明显提高, 为未来的风电功率预测技术指明了发展方向。

**关键词:** 风电功率, 单一预测, 加权组合, 组合预测

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2016.06.004

## Review of the Combination Prediction for Wind Power

Ding Naiqian<sup>1,2</sup>, Chen Zhenghong<sup>3</sup>

(1 Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044 2 Enshi Meteorological Bureau, Enshi 445000 3 Hubei Meteorological Service Centre, Wuhan 430074)

**Abstract:** The study of wind power prediction technology has already begun in 1980's. More and more forecasting methods were invented, and the accuracy was continuously improved. In the rapid development of global wind power industry nowadays, the early prediction system based on a single method could not meet the needs of modern industry, the combination forecast is a new way that slowly appeared in the researches over the world. Through a large number of practical application at home and abroad, we find that the accuracy of combination method has improved dramatically comparing to a single method, and point out the direction of the development in the wind power prediction technology.

**Keyword:** wind power, single forecast, weighted combination, combined forecast

### 0 引言

预测学最早是Jakob Bernoulli (1654—1705年)创立的, 起初是为了减少人类生活各个方面由于不确定性导致错误决策所产生的风险<sup>①</sup>。随着科学的发展, 从20世纪50年代开始, 预测学逐渐成为了一门独立的学科, 被广泛地应用于各个部门和行业, 同时, 随着理论不断地结合实践, 也由最初的经验型向分析技术型过渡, 学科发展逐渐成熟。

人们用多种方法对同一个预测对象进行预测, 通过比较后, 往往会选择预测效果最好的那种方法。但每种预测方法所包含的信息与参数都是不一样的, 出发的角度也不一样, 当我们舍弃其中一种方法的时候, 必然会失去一部分有用的信息, 所以才有了1969年Bates和Granger两人的组合预测理论<sup>[1]</sup>。此方法一经提出, 就受到了国际学术界的重视, 人们开始了对其大量的研究与实践工作。

在组合预测这门学科发展较为成熟的大背景下, 风电功率预测技术也得到了充分的发展。在以丹麦为代表的部分欧洲国家, 数值天气预报模型的集合、数学方法模型的组合及混合模型都取得了非常好的成果, 尤其是在数值预报方面, 研发了专门用于风电场的小尺度数值集合预报模型, 大大提升了在不同风电场风的预报准确率。而在我国, 组合预报才刚刚起步, 且主要集中于数学方法的组合研究工作, 暂时还没有开展数值集合预报的工作。

### 1 研究意义

随着风电产业的发展, 国外的预测技术已经达到了一个非常成熟的阶段, 而国内虽然才起步不久, 但是发展的速度比较快, 有些已经达到了国际先进水平。

然而, 无论是国内还是国外同样面临的一个问题, 就是目前的风功率预报水平已经逐渐不能满足风电发展的需要<sup>[2-7]</sup>: 1) 在电网调度方面, 系统的旋转备用容量依然很多, 大大地增加了电网调度的难度

收稿日期: 2014年8月8日; 修回日期: 2014年11月4日  
第一作者: 丁乃千(1987—), Email: 1179716703@qq.com

① 百度百科. 预测学. <http://baike.baidu.com/view/140693.htm?fr=aladdin>.

和成本。2) 发电企业本身的压力越来越大, 他们的风电要参与市场竞争, 风电自身的不可控性大大降低了其竞争力, 同时还要受到行业管理层的经济惩罚。3) 对风机本身来说, 能合理有效地进行定期维护与检修, 能大大提高发电量和电容系数。4) 我国风资源分布极不均匀, 主要以集中分布的风电场为主, 对于风资源丰富的地区来说, 庞大的电容量上网更需要精确的预测, 而风资源相对匮乏的地区, 为了使少的资源利用率最大化, 也需要精确的预测。

同时还有一个最根本的问题, 目前所有已知的单一风电功率预测方法的精度已经几乎达到了最高水平, 提升的空间非常小。所以, 只有另辟蹊径, 才能达到一个更高的水平。

## 2 组合预测方法分类与简介

1) 根据组合成员不同可以分为物理组合、统计组合和物理-统计组合<sup>[8]</sup>。

物理组合方法的核心也就是数值天气预报(NWP), 随着数值天气预报技术的发展, 集合数值预报逐渐取代了单一的数值预报, 准确率在原有的基础上也得到了很大提高。最后将数值预报的结果进行人工订正后, 带入含有折损系数的风电功率曲线中或实际风电功率曲线中, 就能得到准确率相应较高的风电功率的预报值。

统计组合方法是利用两种或者多种线性或非线性的统计算法进行有目的的加权组合, 能够有效避免各自系统过程中所存在的一部分误差, 较为全面地综合各种方法的优点, 最终也可以提高风电功率预报的准确性。

所谓物理-统计组合, 是指结合物理预测方法和数学统计预测方法的组合法, 它能有效利用混合预测模型, 提高预测精度, 特别是对长时效的预测效果有了明显改善, 比传统的单一预测要更先进, 适用性更好。

2) 根据组合预测与各单一预测方法之间的函数关系可分为线性组合预测和非线性组合预测<sup>[9]</sup>。

所谓线性组合预测法, 是指把 $M$ 个单项预测方法预测出来的值 $f_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, M$ ), 用一个线性的函数 $\Phi(f_1, f_2, \dots, f_M)$ 进行组合, 得到最终的预测值 $f$ , 它包括等权平均组合法、协方差优选组合法和回归组合法等。

下面介绍常用的两种线性组合方法:

### ①等权平均法

$$f = \sum_{i=1}^M \omega_i f_i, \quad (1)$$

式中:  $\omega_i$ 为第 $i$ 个单项预测方法的加权系数,  $i=1, 2, \dots, M$ ;  $\sum_{i=1}^M \omega_i = 1, \omega_i \geq 0$ 。其中,  $\omega_i = 1/M; i=1, \dots, M$ , 则该线性组合预测方法为等权平均方法。该方法是权系数全部相等的预测方法。

### ②协方差最优法

假设每个单项的预测误差方差为 $\sigma_{11}, \sigma_{22}, \dots, \sigma_{MM}$ , 组合预测误差的方差为:

$$\text{Var}(e) = \sum_{i=1}^M \omega_i^2 \sigma_{ii}, \quad (2)$$

在 $\sum_{i=1}^M \omega_i = 1$ 的条件下, 对 $\text{Var}(e)$ 引入拉格朗日乘子求极小值, 把求得各变量的值带入原方程, 即求得最优方程。

所谓非线性组合预测法, 是指把 $M$ 个单项预测方法预测出来的值 $f_i$  ( $i=1, 2, 3, \dots, M$ ), 用一个非线性的函数 $\Phi(f_1, f_2, \dots, f_M)$ 进行组合, 得到最终的预测值 $f$ , 常见的几种非线性组合预测方法有:

### ①加权几何平均法

$$f = \prod_{i=1}^M f_i^{\omega_i}. \quad (3)$$

### ②加权调和平均法

$$f = \left[ \sum_{i=1}^M \frac{\omega_i}{f_i} \right]^{-1}. \quad (4)$$

除了上述传统的非线性组合预测方法外, 还有神经网络组合法, 它能够以任意精度逼近任意的非线性函数, 对各单项预测方法进行非线性组合。并且, 各方法的权重系数, 还可以根据不断的学习训练来进行调整, 使得预报准确率一直保持在很高的水平。

3) 根据组合预测加权系数计算方法的不同可分为最优组合预测方法和非最优组合预测方法<sup>[10]</sup>。

所谓最优组合预测方法是指根据某种准则的构造函数, 在一定的约束条件下求得目标函数的最大值或者最小值, 从而求得组合预测方法加权系数。协方差最优法就是比较常用的最优组合法之一。

而非最优组合预测方法则是指根据预测学的基本原理, 以最简单的方式来确定组合预测的加权系数的一种方法, 该方法实际操作简便, 但准确率不高。

4) 根据组合预测的加权系数是否随时间变化可分为不变权组合预测方法和可变权组合预测方法<sup>[11]</sup>。

不变权组合预测法是通过最优化规划模型或者其他方法计算出各个单项预测方法在组合预测中的加权系数, 让系数不变来进行预测, 最简单的就是等权平均法。

可变权组合预测法是指各单项预测方法的加权系

数是随着时间发生变化的，常见于神经网络组合预测方法，它的准确率往往要高于不变加权组合预测方法。

组合预测在预测时效上主要针对短期预测。

### 3 检验与应用

#### 3.1 预测检验

##### 3.1.1 数值预报集合

1996年，国家气象中心在超级计算机的基础上建立了最早的全球中期集合数值预报，但由于时间和空间分辨率太低，所以没有普及。随后，我国科学家又开发出了自己的数值预报系统（GRAPES），在此基础上研发中尺度集合预报系统。现阶段的风电功率预测所采用的数值预报都是单一的本地化之后的中小尺度天气预报模式，基本上没有针对风电场专门的集合数值预报，而这将成为日后重点突破的对象<sup>[12]</sup>。

相对国内，国外的数值预报研究开展得要早很多，而集合预报的研究也非常成熟，已经由最初的全球中期集合预报延伸到有限区域短期天气预报及月、季、年短期气候预测等方面，同时，在中小尺度极端天气预报方面也开展了结合数值预报的应用研究。正是在这种强大的技术支撑下，Nielsen等<sup>[13]</sup>通过利用欧洲中尺度天气预报中心（ECMWF）的风速集合预报，再把风速转换成风电功率，并对集合预报进行分位数分析，然后校正分位数，最终得出一条最合适的概率预测曲线，跟实际功率曲线比较接近，效果比单一成员要好得多。Lange等<sup>[14]</sup>在介绍德国风电预报进展的时候，提出了通过利用调整参数后的NWP1、NWP2、NWP3和这三种NWP的组合，将输出的数据代入预测模型所得到的风电功率均方根误差（RMSE）分别为组合<NWP1<NWP2<NWP3，充分说明了组合预报的明显优势。Giebel等<sup>[15-16]</sup>提到了如今计算机技术能力非常强大，不能只通过提高分辨率来降低错误率，可以通过处理周期的方式来减少其他出错率，通过使用集合预报，即使它是在同样的模式下不同参数化的数值预报集合结果，也能够最大程度的减小误差。其中他们正在使用的DMI-HIRLAM和DWD-Lokal模式，都是依赖于ECMWF和NCEP两大中心的集合预报，并且通过应用于丹麦各大风电场来不断进行检验与改进。

##### 3.1.2 数学模型组合

胡婷等<sup>[17]</sup>用三种单项预测方法及两种组合预测方法对我国内蒙古某风电场风功率进行了预测对比检验，结果显示三种单项预测方法的均方根误差及误差百分比分别为RBF神经网络模型（53.8467和0.0348）

<LS-SVM模型（67.2820和0.0404）<ARIMA时间序列模型（112.4989和0.0687），而利用两种线性组合预测的加权系数确定方法：最小方差法和最优非负可变加权系数，得到组合预测模型I和组合预测模型II的均方根误差和误差百分比都要小于这三个单项预测模型，且分别为组合预测模型II（23.7530和0.0144）<组合预测模型I（46.6040和0.0269），说明了组合预测准确率要高于单一预测的准确率。张国强等<sup>[18]</sup>也通过利用三种单一预测方法及一种组合预测方法对某风电场进行了预测对比检验，结果显示神经网络在一个星期中每天的预测绝对平均误差明显小于时间序列和灰色预测，而以最小方差法确定加权系数的组合预测的绝对平均误差比三种单一方法的小，也说明了组合预测的准确率要优于单一预测的准确率。刘永前等<sup>[19]</sup>同样用两种单一预测方法及一种组合预测方法进行了对比实验，得出以均方根误差最小确定加权系数的组合预报误差为12%，小于持续法（12.9%）和RBF神经网络法（15.9%），同样得出组合预测准确率要比单一预测高的结论。

#### 3.2 实际应用

##### 3.2.1 国外开发与应用情况

早在2003年丹麦国家实验室就研发出了Zephyr产品<sup>[20]</sup>，它是一款将Prediktor和WPPT模型相结合的风电功率预测系统，它集中了两种模型的优点，其中0~9h的预测采用了基于历史数据的统计预测模型，36~48h则是采用了基于数值天气预报的物理预测模型。

美国的AWS True Wind公司的eWind风电功率预报系统<sup>[21]</sup>，同样是一款组合了北美模式NAM、美国全球预报系统GFS模式、加拿大GEM模式及美国快速更新模式RUC等四种模式的输出结果进行集合作为数值天气预报模式，在统计模型上，也集合了逐步多元线性回归（SMLR）、人工神经网络（ANN）、支持向量回归（SVR）、模糊逻辑聚类（FLC）和主成分分析（PCA）等多种统计模型，使其产生一个集成的预测结果。

而最具有代表性的就是由欧盟资助的，于2002年10月开始为期四年的ANEMOS项目<sup>[22]</sup>，一共7个国家23个机构参加的一个全球性项目。它的目的是开发适用于陆地和海上风电场短期功率预测的方法和工具，它将物理和统计两种预测模型结合到一起，是一种优于之前任何一种单一预测模型的系统。

##### 3.2.2 国内开发与应用情况

由中国电力科学院源研究所和东润环能科技有限

公司联合开发的WPFS Ver1.0系统<sup>①</sup>，是一款以物理模型、统计模型及物理统计混合模型为基础的，针对不同风电场采用不同模型，适应性得到了广泛的应用验证，预报准确率高，服务效果好。

中科伏瑞研发的风电功率预测系统FR3000F<sup>②</sup>，它采用基于中尺度数值天气预报的物理方法和统计方法相结合的预测方法，根据不同资料 and 不同预报时间尺度，对每一种算法的预测结果选取适当的权重进行加权平均从而得到最终的预测值，有效提高了模型的适应能力和预测精度。

上海交通大学与法国兆方美迪联合研发的风电功率预报系统<sup>③</sup>，该系统对未来72h的短期预测采用了基于人工神经网络的统计方法模型、基于解析法和计算流体力学（CFD）的数学物理模型以及统计和物理方法混合模型。

湖北省气象服务中心与风脉可再生能源技术开发有限责任公司联合研发的“象脉风电功率预测预报系统”（WPPS）<sup>[23]</sup>，目前已经升级到2.0版本，该版本是在原来1.0版本基础上，将部分方法集成，最终得到一个集成预报结果。该系统已投入到风电场的业务运行中，运行正常，服务效果有了明显改善。

#### 4 小结与展望

风电功率预测技术已从之前传统单一的方法发展为更为先进的组合的方法，并在实际业务运行中取得了非常好的成效，适应了当下飞速发展的风电产业。

目前，国内外对组合预报方法的研究集中在对数值天气预报的集合和各方法间的组合上。其中，数值天气预报采用的是多模式的集合预报，加入了本地化因子，增加了同化后的非常规资料，大大提高了数值天气预报的准确率；而在方法间的组合上，主要通过设定目标函数的方法，寻找最合适的加权系数，把各个方法之间用线性或非线性的关系式组合到一起，得到新的预报模型。

紧紧抓住风电功率预测是行业的核心竞争力这一关键点，针对我国在风电功率预测上的薄弱环节，大力发展专门的针对不同风电场、不同下垫面及环境的数值天气的集合预报。同时，在组合权系数的研究方法上，除了研究更多的组合方式外，还要在不断的

试验中确定最合适的加权系数。只有组合预报技术越成熟越先进，才能在未来的世界风电领域中占据一席之地。

#### 参考文献

- [1] Bates J M, Granger C W J. The combination of forecasts. *Operational Research Society*, 1969, 20(4): 451-468.
- [2] 韩爽. 风电场功率短期预测方法研究. 北京: 华北电力大学能源与动力工程学院, 2008.
- [3] 叶晨. 风电功率组合预测研究. 北京: 华北电力大学电气与电子工程学院, 2011.
- [4] 王建东, 汪宁渤, 何世恩, 等. 国际风电预测预报机制初探及对中国的启示. *电力建设*: 2010, 31(9): 10-13.
- [5] 舒进, 张保会, 李鹏, 等. 变速恒频风电机组运行控制. *电力系统自动化*, 2008, 32(16): 89-93.
- [6] Rohrig K, Lange B. Improvement of the power system reliability by prediction of wind power generation. *Power Engineering Society General Meeting, Tampa, FL, June 24-28, 2007. IEEE*: 1-8.
- [7] 杨秀媛, 梁贵书. 风力发电的发展及其市场前景. *电网技术*, 2003, 27(7): 78-79.
- [8] 白永祥, 房大中, 侯佑华, 等. 内蒙古电网区域风电功率预测系统. *电网技术*, 2010, 34(10): 157-162.
- [9] 杨江平. 基于神经网络组合预测的风电场风速及风电功率短期预测. 重庆: 重庆大学电气工程学院, 2012.
- [10] 周传世, 刘永清. 变权重组合预测模型的研究. *预测*, 1995(4): 47-48.
- [11] 毛开翼. 关于组合预测中的权重确定及应用. 成都: 成都理工大学信息管理学院, 2007.
- [12] 李泽春, 陈德辉. 国家气象中心集合数值预报业务系统的发展及应用. *应用气象学报*, 2002, 13(1): 1-15.
- [13] Nielsen H A, Madsen H, Nielsen T S, et al. Wind power ensemble forecasting. // *Proceedings of the 2004 Global Windpower Conference and Exhibition, Chicago, 2004*.
- [14] Lange B, Rohrig K, Ernst B, et al. Wind power prediction in Germany-Recent advances and future challenges. *Poster at European Wind Energy Conference, Athens, 2006*.
- [15] Giebel G, Brownsword R, Kariniotakis G, et al. The State of the Art in Short-term Prediction of Wind Power: A Literature Overview. *ANEMOS Report*, 2011.
- [16] Giebel G, Badger J, Louka P, et al. Description of NWP, Mesoscale and CFD models. *ANEMOS Report*, 2006.
- [17] 胡婷, 刘观起, 邵龙, 等. 风电场发电功率组合预测方法研究. *电工电气*, 2013 (5): 23-27.
- [18] 张国强, 张伯明. 基于组合预测的风电场风速及风电机组功率预测. *电力系统自动化*, 2009, 33(18): 92-95.
- [19] 刘永前, 韩爽, 杨勇平, 等. 提前三小时风电机组出力组合预报研究. *太阳能学报*, 2007, 28(8): 839-843.
- [20] Giebel G, Landberg L, Nielsen T S, et al. The zephyr-project: The next generation prediction system. // *Proceedings of Wind Power for the 21st Century, Kassel, Germany, 2002*.
- [21] 王丽伟. 风电场风速及发电功率预测的经济效益研究. 北京: 华北电力大学能源动力与机械工程学院, 2010.
- [22] Kariniotakis G, Halliday J, Marti I, et al. Next Generation Short-term Forecasting of Wind Power Overview of the ANEMOS Project. // *European Wind Energy Conference, Athens, 2006*.
- [23] 许沛华, 陈正洪, 谷春. 风电功率预测预报系统的设计与开发. *水电能源科学*, 30(3): 160-162.

① 东润环能. 风电功率预测系统. <http://www.docin.com/p-244591706.html>.

② 北京中科伏瑞电气技术有限公司. 2010. FR3000F风电功率预测系统技术说明.

③ 兆方美迪. 2010. 兆方美迪风电功率预报系统 (PPT).