中国风电预报体系研究报告

中国气象局公共气象服务中心

中国气象局风能太阳能资源中心

2013年10月

目 录

[1 概述 1](#_Toc376879573)

[1.1 立项目的和意义 1](#_Toc376879574)

[1.2 风电预报相关政策轨迹 2](#_Toc376879575)

[2 国内外数值预报技术现状对比分析 4](#_Toc376879576)

[2.1 引言 4](#_Toc376879577)

[2.2 全球数值预报模式技术对比 5](#_Toc376879578)

[2.3 区域数值预报模式技术对比 7](#_Toc376879579)

[2.4 资料同化技术对比 9](#_Toc376879580)

[2.5 集合预报技术对比 12](#_Toc376879581)

[3 我国风电预报技术现状和发展方向 17](#_Toc376879582)

[3.1 数值天气预报的来源和制作现状 17](#_Toc376879583)

[3.2 风电场观测资料在风电预报中的应用 19](#_Toc376879584)

[3.3 我国风电预报现状评价 20](#_Toc376879585)

[3.4 我国未来风电预报技术发展路线图 21](#_Toc376879586)

[4 国内外风电预报体系对比分析 23](#_Toc376879587)

[4.1 政府支撑和公共服务 23](#_Toc376879588)

[4.2 美国风电预报体系的特点 26](#_Toc376879589)

[4.3 中美风电预报体系的对比 29](#_Toc376879590)

[5 中国未来的风电预报体系 32](#_Toc376879591)

[5.1 基础技术研究 34](#_Toc376879592)

[5.2 公共服务支撑 34](#_Toc376879593)

[5.3 市场化服务 35](#_Toc376879594)

[5.4 风电预报应用 35](#_Toc376879595)

[6 附件 37](#_Toc376879596)

中国风电预报体系研究报告

# 概述

## 立项目的和意义

我国已成为全球风电装机第一大国，但因尚未很好得解决风电与电网协调发展问题，同时也是弃风率较高的国家之一。至2012年底，全国风电装机容量已达到6524.72万KW，弃风问题非常严重，国家能源局统计数据显示，2012年全国风电弃风率高达17.12%，其中，蒙东和吉林弃风率超过30%，蒙西和甘肃弃风率超过20%，全国因弃风损失电量达208.22亿千瓦时，严重影响了风电场的经济效益。

国外风电发达国家的实践证明，风电预报是科学安排风电场运行管理、有效提高电网消纳风电能力的重要技术措施之一。目前，风电开发利用效率高、技术先进的欧美等国已建立了科学、完善的风电功率预测技术体系和高效、经济的服务管理机制。但我国风电预报起步晚，相应的基础条件、技术水平、服务能力等与美国、欧洲等发达国家相比存在很大差距，更远远跟不上我国风电开发快速发展的需要。尽快建立适于中国实际需要的、能够有效促进我国风电预报技术和服务能力快速发展的风电预报体系显得尤为紧迫。

本项目是在中国政府于2011年6月颁布的《风电场功率预测预报管理暂行办法》和2012年1月印发的《风电功率预报与电网协调运行实施细则（试行）》原则指导下，通过广泛、充分的调研，结合中国风能资源特点和风电发展需求，立项研究适于中国的风电预报体系，提出构建科学、可持续、可操作的中国风电预报技术发展方案。

## 风电预报相关政策轨迹

为促进我国风电并网和保障电力系统安全运行，国家能源局于2011年6月印发了《风电场功率预测预报管理暂行办法》(国能新能〔2011〕177号)，要求全国所有并网运行风电场均需具备风电功率预测预报的能力，配备专职人员负责系统运行维护、预测预报管理和向电网调度机构实时传送数据等工作。《办法》明确提出了风电预测预报系统的基本功能要求以及风电场预测准确性的考核指标，为促进我国风电功率预报工作的开展起到了极大的推动作用。《办法》的试行，推动了全国绝大多数已并网风电场快速安装了风电功率预报系统，但逐渐出现一些与政策设计相悖的问题浮出水面，比如缺乏数值天气预报的有效支撑，风电预报准确性和稳定性不理想，惩罚性考核背离了《办法》设计初衷等。

为正确理解、贯彻落实《办法》，国家能源又于2012年1月印发了《风电功率预报与电网协调运行实施细则》（特急 国能新能〔2012〕12号），《细则》对《办法》做了进一步解释和补充，指出了数值天气预报作为风电预测预报的基础对提高风电预测预报水平的重要支撑作用，并提出由中国气象局负责建立风能数值天气预报公共服务平台，负责制定风电预测预报专业观测网建设和运行技术规定以及风电预测预报专业观测网数据的提交和共享服务工作，《细则》的执行为我国风电预报技术的持续发展起到了积极的作用。

2013年2月，国家能源局印发《国家能源局关于做好2013年风电并网和消纳相关工作的通知》(国能新能〔2013〕65号)，对弃风限电问题提出了系统性的对策：1）将风电利用率与风电开发联系起来——风电运行情况好的地区可适当加快建设进度，风电利用率很低的地区在解决严重“弃风”问题之前原则上不再扩大风电建设规模；2）强调因地制宜开展风电并网消纳工作——提出从风电供热、风水互补、输电通道建设、打破行政区域限制、挖掘系统调峰潜力等多种渠道解决弃风限电问题。

# 国内外数值预报技术现状对比分析

## 引言

风电功率预报是为保障风电并网的安全高效运行而提供的一种不可间断的、具有一定准确度的、稳定的业务化电力预测数据产品，而可靠地数值天气预报则是开展风电功率预报的核心和基础。

数值天气预报是指根据大气实际情况，在一定的初值和边值条件下，通过大型计算机作数值计算，求解描写天气演变过程的流体力学和热力学的方程组，预测未来一定时段的大气[运动状态](http://baike.baidu.com/view/3365449.htm%22%20%5Ct%20%22_blank)和[天气现象](http://baike.baidu.com/view/42422.htm%22%20%5Ct%20%22_blank)的方法。全世界已有30多个国家和地区把数值天气预报作为制作日常天气预报的主要方法。

数值天气预报根据预报的时间尺度可分为两类：1～2天的短期数值天气预报和7～10天左右的中期数值天气预报。中期数值天气预报覆盖全球，也可称之为全球数值预报，其分辨率相对较粗，模式顶高度较高。短期数值天气预报的范围只是某个有限的区域，也常称之为区域数值天气预报，其分辨率相对较高，模式顶较低，物理过程参数化方案相对较复杂。

制作一份较为可靠的数值天气预报，至少需要运行全球环流数值模式、区域数值模式和统计订正模型（见图1）。决定数值天气预报产品质量（准确性、稳定性）的关键技术包括：（1）全球和区域数值预报模式技术能力；（2）实时观测资料的同化技术；（3）数值预报模式集合技术；（4）数值预报解释应用技术（即动力降尺度和统计订正技术）。

|  |
| --- |
| 图1支撑风电预报业务的数值模式和模型及流程**全球数值预报模式****区域数值预报模式****统计订正模型****风电功率预报业务产品** |

本报告就我国与欧美发达国家在全球和区域数值预报模式、资料同化和模式集合技术现状及其在风电领域中的应用能力等方面进行对比分析。

## 全球数值预报模式技术对比

全球数值预报模式的预报产品可作为区域数值预报模式的初始场和边界条件，其性能和预报产品质量对区域数值模式的预报效果有直接影响。

世界主要数值预报业务中心的全球数值预报模式水平分辨率基本在16-30km之间，目前国际上技术最先进、使用最广泛的全球预报模式产品有欧洲中期数值预报中心（ECMWF）的模式产品、美国NCEP的模式产品等。在我国，气象部门还广泛使用自主研发的T639模式、GRAPES模式等数值天气预报产品。

上述模式产品在水平分辨率、垂直层数、运行次数、核心技术等方面均有不同。

表1 全球数值预报模式基本技术指标

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **全球数值预报模式** | **国家/机构** | **模式名称** | **水平分辨率（km）** | **垂直层（层）** | **同化技术** | **每日运行次数（次）** |
| ECMWF | TL1279 | 16 | 91  | 集合变分同化 | 4  |
| NCEP | T574 | 28 | 64  | 混合三维变分同化 | 4  |
| CMA | T639 | 30 | 60  | 三维变分同化 | 2  |

由表1可见，欧洲中期数值预报中心（ECMWF）的全球模式TL1279预报产品水平分辨率约为16km，垂直91层，每天运行4次，同化系统为集合变分同化；美国NCEP的全球模式T574预报产品分辨率约为28km，垂直64层，每天运行4次，同化系统采用混合三维变分同化技术；中国气象局的全球模式T639预报产品分辨率约为30km，垂直方向60层，每天运行2次，同化系统采用三维变分同化技术。

总体来看，中国目前可业务化的全球预报模式分辨率较低，垂直层数较少，同化技术相对落后。

## 区域数值预报模式技术对比

区域数值预报模式主要着眼于本地化应用，具有本地化特点，具备条件的国家或地区都在发展自己的区域数值预报模式，并且由于发展基础的差异，不同模式在核心技术、精细化程度等方面都有不同。

美国的区域模式采用了多个高分辨率窗口的设计，只对必要的区域运行多个高分辨率中尺度模式，分辨率在3-6km之间，在外围嵌套一个分辨率10km左右的网格进行运算，垂直方向为70层，同化系统采用三维变分技术，一般每日运行两次，每次预报时效为48hr（需查证）。

英国区域模式产品也有两种水平分辨率，分别是12km和1.5km，垂直方向有70层，模式系统每小时滚动1次，每次的预报时效为36hr，四维变分同化系统应用于12km分辨率的区域，三维变分同化系统应用于1.5km分辨率的区域。

法国的区域模式水平分辨率为2.5km，垂直方向60层，每日运行4次，预报时效48hr，采用三维变分同化技术做资料同化。

中国目前的区域业务模式GRAPES-MESO可实现全国水平分辨率15km的预报，垂直方向31层，一天运行2次，预报时效60hr，同化系统采用3维变分同化技术。此外，中国还在各区域气象中心运行各自的区域数值预报业务模式，如：BJ-RUC数值模式系统，该系统重点关注华北区域的短期数值预报，在华北区域该模式系统的水平分辨率为3km，垂直方向38层，每3小时滚动运算一次，每次做未来24小时预报，在其他区域分辨率为9km，基本可覆盖N23°以北的中国所有区域，在该区域模式系统每天运行两次，每次预报未来72hr，同化系统采用3Dvar；GD-GRAPES（需查证）数值模式系统重点关注华南区域的短期数值预报，模式系统在华南区域分辨率为6km，垂直方向40层，每日运行两次，每次预报时效为72hr，同化系统采用3Dvar。

表2 主要的区域数值预报模式基本指标

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **区域数值****预报模式** | **国家/机构** | **水平分辨率（km）** | **同化技术** | **垂直层（层）** |
| UKMO | 12 | 4Dvar | 70 |
| 1.5 | 3Dvar |
| MeteoFrance | 2.5 | 3Dvar | 60 |
| NCEP | 10 | 3Dvar | 70 |
| 3、 4、 6、 |

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| **CMA区域数值****预报模式** | GRAPES-MESO | 15 | 3Dvar | 31 |
| BJ-RUC | 9、3 | 3Dvar | 38 |
| GD-GRAPES | 6 | 3Dvar | 40 |
| …… | …… | …… | …… |

注：欧洲中心只研发全球模式，没有区域模式。

总体来看，我国业务化的区域数值模式分辨率相对较粗，垂直层数少于欧美国家的业务模式，每天的运行次数也相对较少，与国外的业务水平有一定差距。

## 资料同化技术对比

* + 1. **基本概念及发展历程**

[资料同化](http://baike.baidu.com/view/3814854.htm%22%20%5Ct%20%22_blank)就是将各种不同来源，不同误差信息，不同[时空分辨率](http://baike.baidu.com/view/3822106.htm%22%20%5Ct%20%22_blank)的观测资料融合进入数值动力模式，依据严格的数学理论，在模式解与实际观测之间找到一个[最优解](http://baike.baidu.com/view/1009692.htm%22%20%5Ct%20%22_blank)，这个最优解可以继续为动力模式提供初始场，以此不断循环下去，使得模式的结果不断地向[观测值](http://baike.baidu.com/view/2135324.htm%22%20%5Ct%20%22_blank)靠拢。可以说，资料同化技术是提高数值预报准确性的关键技术之一。

经过30多年的发展，资料同化技术已成为现代数值天气预报的基础，它经历了从简单到复杂，从起步到成熟的发展历程:从主观分析到客观分析;从多项式函数拟合方法、逐步订正方法、最优插值方法到变分方法和集合卡尔曼滤波方法，都印证了这一点。如今，基于最优控制理论的变分方法（3维变分和4维变分）和基于估计理论的集合卡尔曼滤波方法成为数据同化的两大主流方法。这两类方法各有优缺点，为了将二者的优势互补，逐步发展了一些新的方法：集合卡尔曼滤波与变分相结合的数据同化，简称为集合（混合）变分同化。

各业务中心的全球模式和区域模式均应用了资料同化技术。图3显示了已经投入业务应用的同化系统的发展进程：早期的业务同化系统主流是三维变分，后发展为四维变分系统，而近两年则以集合变分和混合变分同化技术为主。

图3 气象业务模式的同化技术发展历程

三维变分是把某个时间窗的观测资料当做中间时刻资料融合到模式格点资料（背景场）中，模式场误差信息是静态的，不随时间变化。四维变分是观测资料融合到模式格点资料中时，考虑观测信息随时间的变化，同时模式误差信息随着模式积分也是隐式发展的。集合同化是为了更好的同化观测资料，用一组集合场来描述模式误差信息随时间的变化，这更接近真实的模式误差。混合同化就是根据实际大气系统，用静态模型化的模式误差信息和动态的随时间变化的误差信息相结合，通过调节两者的比例来更好的同化观测资料。

美国NCEP就在2012年将其全球同化系统GSI更新为混合变分同化系统，使得其2012年的全球预报效果比2011年有显著进步，成为2012年进步最快的全球预报系统，可见先进同化技术的研发及业务应用会对预报效果起明显作用。欧洲和法国已将同化系统更新为集合变分同化系统，英国也实现了资料同化系统从四维变分到混合四维变分的更新，加拿大正在发展集合变分同化技术以替代目前的四维变分同化技术，而中国目前的业务模式还是三维变分同化技术，可见在同化技术的研发方面，中国和欧美强国之间具有一定差距。值得一提的是，目前的资料同化技术基本是针对常规资料、卫星资料、雷达资料等气象资料开发的，而对于风电场区的局地观测资料，如：测风塔测风数据，风机测风数据等，没有进行相应的同化技术研发。

* + 1. **在风电预报中的应用**

资料同化技术在风电预报领域应用方面，美国走在前列。Precision Wind LLC和科罗拉多州立大学（CSU）共同研发的风电预测系统可同化风电场观测的风和电功率数据，能显著减小风电功率突变时的预报误差。NCAR的RAL实验室和Xcel能源公司联合研发了具备实时四维资料同化（RTFDDA）能力的风电预报系统，可同化常规资料和风电场风机测风数据，提供分辨率为0.5-3km的预报产品，提高了对风电场发电量跃变的预报能力。

在中国，资料同化技术在常规气象数值天气预报业务中的应用比较广泛，但在风电预报领域的应用还很少，尤其是对特殊的局地观测资料同化很少。中国气象局目前应用常规气象数值天气预报业务产品开展风电预报技术研发，而非气象部门的风电预报服务机构多只通过简单的数值预报模式运行，不做任何资料的同化就开展风电功率预测服务。近两年中国气象局公共气象服务中心和中国电科院也开始研发风电场区风机资料同化技术，以期提高对局地风场的预报能力。

虽然，目前还未看到欧洲国家应用同化技术专门同化风电场风机资料及测风塔资料的报道，但是该技术在欧洲的数值天气预报中应用十分广泛，技术也非常先进。

## 集合预报技术对比

* + 1. **基本概念与意义**

众所周知，再优秀的数值模式也有可能做出很糟糕的预报，这是由大气的混沌特性导致的。因为在做数值预报时，首先会根据最新观测资料分析、估计出当前大气的状态，然后模式才开始计算积分，得到大气状态如何从最初状态随时间演变。而混沌理论表明大气状态的演变对于初始场的微小误差非常敏感，这种误差在预报中会逐渐变大，谁也无法肯定某个确切的分析场就是最真的初始场，所以即便是拥有最好的观测资料，也无法做出最完美的数值预报，这就是要做集合预报的原因。

集合预报从原理上讲也可称之为概率预报。其最终目的就是要提供所有大气变量的完全概率预报，可定义为一个模式或多个模式从稍加扰动的初始条件出发运行多次，从而达到估计由于初始条件和模式本身的误差引起的预报不确定性的目的。初值的生成是集合预报系统的第一步，通常是采用某种扰动方法生成一系列小扰动量分别叠加到分析场上，形成模式初始数据集，并由此制作集合数值预报。早期的集合预报多为仅考虑初值的不确定性，经过研究应用，目前的集合预报系统已将模式物理过程的不确定性考虑进去，通常有两类做法：一是用单一模式，对该模式物理过程中的一些不确定、但对预报结果很敏感的部分，如云的参数化、下垫面的作用如土壤湿度等在模式积分过程中或者可以把它们当作随机过程来处理，或者任意选用不同的参数化方案；另一种做法是利用两个或两个以上集合预报子系统，做超级集合预报。

* + 1. **全球模式集合**

目前全球各主要业务中心的全球集合预报模式水平分辨率大约在30km-100km之间，集合成员个数在15-50之间，预报时效在4-16天；ECMWF的集合预报系统水平分辨率为细网格约30km、粗网格约为60km两种，垂直方向均为62层，集合成员51个，细网格的预报时效为10天，粗网格预报时效可达15天；美国NCEP的全球集合预报系统也有两种水平分辨率，细网格约为70km，粗网格约为100km，垂直方向均为42层，集合成员45个，细网格的预报时效为8天，粗网格的预报时效可达16天。

中国气象局的全球集合预报系统水平分辨率约为60km，垂直方向31层，预报时效10天，集合成员15个。全球各主要集合预报产品指标见表3。

表3 集合预报模式基本技术现状

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **范围** | **国家/机构** | **分辨率（km）** | **垂直层（层）** | **成员（个数）** | **预报时效（天）** |

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **全球****集合****预报** | ECMWF | 60,30 | 62  | 51 | 15,10 |
| NCEP | 100，70 | 42 | 45 | 16,8 |
| CMA | 60 | 31  | 15 | 10 |
| **区域****集合****预报** | UKMO | 18，2.2 | - | 12 | 1.5 |
| MeteoFrance | 15 | 60  | 35 | 4 |
| CMC | 15 | 58  | 20 | 3 |
| NCEP | 16 | - | 21 | 3.5 |
| CMA | 15 | 31  | 15 | 2.5 |

从集合预报的初值扰动技术和不确定性技术来看：欧美国家的初值扰动技术多为比较先进的集合卡曼滤波类方法、集合同化法或奇异向量法，而中国还是比较早的增长模繁殖法；欧美国家多通过物理过程的随机扰动、随机物理过程、随机动能后向散射、模式全倾向随机扰动等方法在集合预报系统中考虑模式的不确定性，而中国的集合预报系统中尚未考虑模式的不确定性。由此看来，中国在初值扰动技术及考虑模式不确定性方面与欧美国家还有较大差距。

* + 1. **区域模式集合**

主要业务中心的区域集合预报系统分辨率多在2-40km之间，预报时效一般为1-4天，集合成员在10-30之间。表3显示：美国的区域集合预报系统水平分辨率为16km，预报时效3.5天，有21个集合成员，除了初值扰动和模式不确定性技术应用，还考虑多个陆面模式初值来引入下垫面的扰动；法国的区域集合预报系统分辨率为15km，预报时效4天，集合成员35个，并考虑了模式不确定性和下垫面扰动；美国和法国研发的更高分辨率的区域集合预报系统正在业务试运行；英国（水平分辨率为2.2km，集合成员12个）和德国（水平分辨率为2.8km，集合成员20个）已经业务运行高分辨率的区域集合预报系统，预报时效在1天左右。

中国目前有两套区域集合预报系统，WRF-EPS已业务运行，每天运行2次，GRAPES-EPS正在试运行。两套集合预报系统的水平分辨率均为15km，集合成员15个，通过增长模繁殖法扰动技术构造初值场，并通过多种参数化方案的组合考虑了模式的不确定性，预报时效为60h。

总体来看，中国的区域集合预报系统与欧美强国相比具有一定差距，尤其是水平分辨率较粗、未考虑下垫面的扰动。

* + 1. **集合预报在风电行业的应用**

集合预报技术在风电预测领域的应用近10年来，欧美等发达国家已将集合预报产品和集合技术应用到风电预报领域。

丹麦RISO实验室将ECMWF的全球集合预报50个成员的产品和NCEP的11个全球集合预报产品通过两个区域气象模式（DMI-HIRLAM和DWD-localmodel）的动力降尺度计算，为风电功率预测服务提供良好的支持。

德国、西班牙等欧洲国家或直接使用ECMWF的高分辨的集合预报产品，或自行使用多源的模式预报结果进行集合。

美国在风电预报中应用集合预报技术迅速发展，NCAR的RAL实验室基于MM5和WRF模式开发了一个专门针对风能预报的集合预报系统，在Xcel公司进行应用。伊利诺斯大学大气科学系基于WRFSCM模式和初值扰动技术、不同近地层参数化方案、边界层参数化方案的选择构造了一个21个集合成员的集合预报系统，专为超短期风电预报应用。RENO大学沙漠研究所基于WRF模式及WRF的变分同化系统研发了针对风电预报应用的区域集合预报模式系统。

集合预报技术在中国的常规气象预报业务中已有应用，中国气象局已自主开发了中国的全球集合预报系统和区域集合预报系统，但是其集合预报产品还未在风电领域进行应用，中国电科院也正在尝试研发集合预报系统，其它风电预报服务商均以确定性预报为风电功率预报模型的输入场，还未开始针对风电功率预报做集合预报。这种现状和欧美国家有很大差距。

# 我国风电预报技术现状和发展方向

## 数值天气预报的来源和制作现状

目前我国用于风电功率预报的数值天气预报来源较多（见表4），制作技术良莠不齐，其中，部分经济实力较雄厚的国企风电功率预报服务机构投资搭建（WRF）模式系统来自行制作数值天气预报，但因不具备同化我国实时气象观测资料的基本条件，集合技术研发应用能力有限，因此对其技术的进一步发展和预报准确性的提高存在难以逾越的障碍；部分服务机构直接购买或网上下载国外数值天气预报，因国外数值天气预报也不具备实时同化我国详细实测资料的条件，因此，也存在明显的缺陷。

表4 部分风电功率预报系统服务机构的数值天气预报制作或来源

|  |  |
| --- | --- |
| **风电功率预报系统服务机构** | **数值天气预报主要来源** |
| 中国电力科学研究院 | 自行运行WRF模式地方气象局提供 |
| 东润环能（北京）科技有限公司 | 中国电力科学研究院提供西班牙、中科院 |
| 国电南瑞科技股份有限公司 | 气象部门其他来源 |
| [北京国能日新系统控制技术有限公司](http://sprixin.cn.china.cn/%22%20%5Ct%20%22_blank) | 气象部门 |
| 兆方美的风能工程（上海）有限公司 | 欧洲气象集团 |
| 龙源电力集团股份有限公司 | 自行运行WRF模式 |
| [北京清电科技有限公司](http://3634663.71ab.com/%22%20%5Ct%20%22_blank) | 气象部门 |
| 北京木联能软件技术有限公司 | 气象部门 |

根据我国目前应用于风电预报的数值天气预报制作或产品来源现状，可大致分为四类：（1）气象业务类；（2）简化应用类；（3）简单加工类；（4）直接引用类。

（1）气象业务类：采用中尺度数值天气预报模式，以大尺度背景场为侧边界条件，同化我国气象探测资料得到中尺度预报结果，并在此基础上进行降尺度和统计订正，得到更加精细化、准确的数值天气预报结果。这种做法虽然比较专业，但由于未应用集合预报技术，得到的只是某一确定性预报结果，对风电行业关注的重点天气事件概率预报没有涉及，所以和理想的风电预报产品还有一定差距。

（2）简化应用类：采用中尺度数值天气预报模式，以大尺度背景场为侧边界条件，直接生成中尺度的预报结果，并在此基础上进行动力或者统计降尺度得出最终预报结果。该类方法与“气象业务类”方法相比，主要区别是没有同化区域气象探测资料。中国电力科学研究院、龙源集团等单位大致采用这种做法。

（3）简单加工类：直接下载免费的、分辨率较粗的全球模式预报结果，采用插值或者其他降尺度方法得到风电场尺度的数值天气预报。

（4）直接引进类：从国外的气象服务机构购买相对较精细的数值天气预报产品直接应用，不考虑本地实测资料的应用。东润环能等机构多采用这种做法。

表5 各类型数值天气预报的技术要点对比

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **类型** | **技术要点** | **特点** |
| **气象业务类** | 数值天气模式+观测资料同化+预报订正 | 集合预报方法尚未在短期预报业务中广泛应用 |
| **简化应用类** | 数值天气模式 | 简化了模式的物理过程，鲜有观测资料同化 |
| **简单加工类** | 统计、插值 | 不运行中尺度模式，直接对大尺度背景场做插值或者其他统计处理 |
| **直接引进类** | 数值天气模式+预报订正 | 模式在国外运行，不具备同化气象资料的条件 |

## 风电场观测资料在风电预报中的应用

风电场观测资料主要包括测风塔资料和风机机舱顶部测风资料，是模式资料同化和进一步统计订正的宝贵数据资源，充分、科学地使用风电场测风资料对于提升预报准确率至关重要。

（待权威部门掌握的测风塔个数来补充）

我国目前已拥有大量的风电场观测数据。据了解，仅龙源集团和华润集团先后建成的测风塔数量就分别超过1000座和600座。另据一家规模较大的风电场测风服务机构相关人士透露，由其承担的风电场测风塔建设总数达到了7000多座。此外，由气象部门建设管理的“全国风能专业观测网”，现有近300座测风塔仍在观测运行。但这些宝贵的风电场数据中，只有极少量的数据用于风电场风电功率预报统计模型的一次性构建，尚未在风电预报中得到有效应用。

造成这一问题的原因也是多方面的：

（1）缺乏统一的技术标准，观测仪器类型多，且大多没有经过专业计量机构的标定，数据质量难以保证；

（2）缺乏资料统一收集、处理和共享机制，大量的资料分散掌握在企业手中，而从事预报服务的机构则很难得到该数据，更难以将资料集中起来同化应用到数值天气预报模式中。

## 我国风电预报现状评价

（1）我国风电预报的公共服务系统建设、基础支撑和服务保障能力严重不足。缺乏科学的、可操作性强的相关技术规范标准。

（2）我国风电预报的专业化、精细化技术水平整体偏低。国家（省或区域）公共数值预报产品从本质上仍是常规的天气预报产品，离风电预报的专业化、精细化技术要求差距较大。

（3）风电预报基础建设、技术发展和业务服务能力，未形成集约化、共享和义务结合的发展机制，风电预报服务产品的质量差、代价高。

（4）风电预报尚未在风电并网调度中充分发挥其应有的作用。

（5）我国现行的单一的风电预报质量考核指标与我国风气候具有十分显著的区域差异特点不相适应，部分地方考核方式不够客观、科学，考核过程不够透明、公开，以及在风电开发企业和电网运行机构之间产生新的问题和矛盾。

## 我国未来风电预报技术发展路线图

就目前气象科技发展水平，制作较为理想的风电预报产品应包括以下技术、条件和步骤：在基于全球资料同化和集合技术应用的全球数值预报模式输出全球集合预报数据基础上，再运行基于本地资料同化和集合技术应用的区域中尺度数值预报模式，得到时空分辨率更高的区域集合预报模式产品，在此基础上，根据地形特点对此产品进行动力降尺度或统计降尺度，再利用风电场区域测风塔、风机机舱测风仪测风数据，建立个性化的多种类统计订正模型，从而获得更高质量的风电预报产品。

根据我国风电预报技术现状，提出了我国未来风电预报技术发展路线图（图4）。

图4 风电预报技术发展路线图

# 国内外风电预报体系对比分析

## 政府支撑和公共服务

* + 1. **国际**

在风能预报技术发展、政府为社会提供服务等方面，欧美国家一直处于技术领先地位，对全球风电发展起到示范和推动作用。在过去的十多年间，政府支持与企业合作的研究计划惠及包括资源评估、技术标准、并网以及风电预报等领域。

1974-2006年间，IEA国家在风电领域获得研发经费支持达到38亿美元（2005年美元水平），约为可再生能源研究经费的10%，能源研究的1%（IEA，2008；EWEA，2009）。2008年，OCED国家风电研究经费为1.8亿美元。

政府支持的研究主要致力于长期、持续的技术创新，企业的研究主要瞄准近期在产品、运行和安装等领域的技术提高。美国能源部（US DOE）支持开展风电满足20%电力需求技术和经济可行性分析研究。欧洲风电技术平台（TPWind）提出一个2020技术研究路线图，试图构建未来欧洲风电研究政策，包括：风电系统（新型风机和部件）、海上风电开发和运行、风电并网和风能资源评估、预报等。

关于国家气象部门在风电预报服务中的地位和作用，欧美公立气象机构（以国家气象局、研究机构为主）主要负责数值天气预报模式技术研发，并提供国家财政支出下生产的基本风电公共预报服务产品。

在美国，美国大气海洋局（NOAA）在政府的支持下，由其下属的国家环境预报中心（NCEP）发展了GFS模式，并发布多种数值预报产品，为公众或专业气象服务公司提供基础数值天气预报产品；NCAR 、NREL等研究机构在美国能源部的支持下，致力于发展风能数值预报技术和模式系统，最终通过合同或协议将这些技术有偿推广移植到电网公司或风电企业（如Xcel、AWS等） ，并通过合同或协议提供持续的技术支持，但并不直接提供风电预报产品服务。

在欧洲，丹麦和西班牙在风电预报方面的起步较早，这主要是基于其较为完善的风电交易市场体系和规范的制度，10多年的经验证明，风电预报有效地提高了电网对风电的接纳能力、风电场的运行效率和经济效益；大多数国家公立气象部门（包括研究机构），如欧洲中期数值预报中心、英国气象局、丹麦气象局、德国气象局、丹麦可再生能源实验室（Riso）等，在欧盟或企业的支持下，开展用于风电预报在内的数值天气预报技术和模式研发，提供基本的公共服务产品，并负责将研发的可用于风电预报的先进技术向风电预报服务机构或风电开发企业、电网运营公司推广，在国家公共财政或基金的支持下进行技术的再发展、再提高；以丹麦气象局、英国气象局为代表的少数国家气象局，也承担了有偿的风电数值预报服务，如：丹麦气象局向丹麦国家电网公司和风电企业有偿提供覆盖丹麦全国的区域数值预报产品等。

* + 1. **国内**

为促进风电持续健康发展，保证风电顺利并网和电力系统安全运行，国家能源局于2011年印发了《风电功率预测预报管理暂行办法》(国能新能【2011】177号)，要求风电场经营企业按要求提前对一定运行时间内风电场发电有功功率进行分析预报，并向电网调度机构提交预报结果，以提高风电场与电力系统协调运行的能力；电网调度机构应根据风电场传送的功率预测结果，综合考虑系统运行要求，按照优先调度风电的原则，编制风电场发电计划。2012年，国家能源局又下发《风电功率预报与电网协调运行实施细则（试行）》(国能新能【2012】12号)，明确了各相关机构和企业在风电功率预测工作中的职责：中国气象局负责建立风能数值天气预报服务平台和业务运行保障体系，为风电功率预测提供数值天气 预报公共服务产品和技术支持；风电开发企业负责风电场发电功率预报工作；电网调度机构负责电力系统风电发电功率预测工作，落实风电全额保障性收购措施。

除出台相关的政策予以支持和规范外，国家在风电预报技术方面的投入主要以研究项目（课题）的方式加以支持，总的支持力度大约在1000万人民币左右。国家电网公司、国电龙源等大型电力集团公司等国有企业，也自主组织开展了风电功率预报方面的技术研发和业务系统建设。

为了做好风电功率预报预测的技术支持，中国气象局组织业务技术单位，先后以科研课题立项方式，针对风电预报需求的数值预报模式、解释应用方法以及风电功率预报业务化运行技术等进行研究，为响应国家能源局下发的《风电功率预报与电网协调运行实施细则（试行）》 (国能新能【2012】12号)文件，中国气象局组织部门优势技术力量，集中攻关，于2012年底初步完成了我国国家风能太阳能数值预报公共服务平台开发，具备了基本的数值预报产品初步处理、下载功能。但由于缺少专项投入，缺乏包括通讯、计算存储等支撑基本公共服务的保障条件和能力，该平台只停留在试用阶段，难以正式投入业务运行和提供日常服务。

此外，鉴于行业对风电专业数值预报气象服务的迫切需求，部分科研机构、高校和气象部门也开展了一些成本补偿性的专业气象服务，取得了一定的服务效果，但由于缺乏必要的业务运行基础条件和长效机制的保障，难以保障其业务服务的稳定性、安全性和技术发展。

我国风电预报的公共服务系统建设、基础支撑和服务保障能力严重不足，离建立完善的风电预报基础支撑体系相差甚远。

## 美国风电预报体系的特点

* + 1. **界限明确**

在美国，风能太阳能预报相关的单位主要有四类：（1）国家的科学研究单位，比如NCAR、NREL；（2）国家拨款的公益性服务单位，如NOAA；（3）私营的预报服务公司，如AWS；（4）电力公司，如Xcel。

这四类单位在预报领域各司其职：NCAR、NREL作为国家级的研究单位，主要负责预报技术和产业政策等方面的研究，但不直接为用户提供运营性质的服务；美国气象局作为国家拨款的公益性服务单位，只负责提供与人民生活财产有关的天气预报，相关预报结果直接在网站上发布，供公众或者其他专业气象服务公司使用，不面向专业用户直接提供商业气象服务；NOAA会发布多种数值预报指导产品，供社会使用；私营预报服务公司，主要面向专业用户的个性化需求，利用多种来源的数值天气预报结果，加工生成专业化的服务产品，一般情况下不会直接运行数值天气预报模式，服务成本和价格都不高；有些情况下，私营气象服务公司（如Global Weather）还会帮助用户管理预报系统；电力公司或电网调度机构主要考虑从如何更好地理解、应用和评价预报结果。

总体来看，不同类型机构的职责比较明确，虽然有些方面有交叉，但是总体界限比较清晰，国家拨款单位重点是做好支撑，一般不与私营单位竞争。

* + 1. **合作密切**

风能太阳能预报涉及数值天气预报、边界层气象学、卫星遥感、气象到功率的转换、电力调度等多个方面，技术复杂，难度大，仅靠单个部门很难做好，跨部门的合作是必要的。虽然，在美国，不同类型单位间的界限清晰，但是这并不影响跨部门合作。

以Xcel公司的预报系统研发为例，Xcel公司负责收集基础数据、应用预报结果、评价预报效果、评估预报价值，NCAR主要负责数值天气预报模式系统研发，研发成功后NCAR即退出，系统移交给私营的气象服务公司负责运行和二次开发。该项目还获得了美国能源部的支持，获得了30万美元的项目资助。这个项目是跨部门合作的典型案例。也许正是由于部门间的界限清楚，才让不同单位专注于自己的领域，少了很多顾虑和戒心，也少了很多合作障碍。

* + 1. **技术发展有计划**

美国风能预报技术的发展是有计划、成体系的，从NCAR和Xcel的合作项目中大致可以看到有以下几个方面：（1）提升空间分辨率——对于未来24小时的预报，空间分辨率为3KM，对24-72小时的预报，空间分辨率为10KM；（2）资料同化——将风电场观测资料实时同化进入模式；（3）集合预报——对多种模式结果进行集合应用，这是基本的技术，应用相当普遍；（4）后处理——对模式结果进行后处理，通过提升对数值天气模式结果的解释应用水平，提高预报准确率；（5）快速更新——每三小时更新一次模式预报结果。这些技术还在不断地发展当中。

NOAA也在发展新一代的模式系统HRRR。HRRR采用快速更新小时循环技术，使数值预报结果与观测值通过3DVAR系统逐小时生成分析场，并进入模式系统开始下一小时的预报，以此循环，每隔1小时启动一套模式。模式目前在ESRL的超级计算机上实时试验运行，结果可以为能源、航空等领域提供指导预报。为了改善风机轮毂高度处风的预报，NOAA在模式粗糙度修正、雷达资料同化等方面也开展了不少研究工作。

## 中美风电预报体系的对比

* + 1. **社会组织体系**

美国，不同性质单位或机构的职责明确，界限清晰，同时合作也非常紧密。以风电预报为例，以国家财政支持为主的气象研究机构，主要负责数值天气预报技术研究，一般不直接为用户提供商业化运营性质的服务；国有公共服务单位，主要负责制作和发布全国数值天气预报指导产品，供公众或者气象服务公司使用，但并不承诺数值天气预报准确率，以及由此衍生的风电功率预报产品的准确率；私营预报服务公司，主要面向终端用户的个性化需求，利用多种来源的数值天气预报结果，着力研究数值天气预报产品地释用技术，进而加工生成专业化的风电预报服务产品，一般情况下不会直接运行耗费资源较多、技术难度较大、运行保障维护要求高的数值天气预报模式；用户主要关注如何理解、应用和评价预报结果。

中国，虽然科研、气象部门、企业等多类单位或机构都已经参与其中，但由于体系性的设计和服务界定，各类单位都有合作的顾虑和戒心，存在“盲目求大求全、缺少合作、低水平重复”的现象，难以充分发挥整体合力，严重限制了研究成果的社会共享和预报技术水平的整体提升。另外，对于技术难度大、运行成本高的数值天气预报而言，因缺乏资金等多方面的支持，在公共服务方面对行业的支撑力度也存在不足。

* + 1. **技术发展体系**

数值天气预报是功率预报的核心和基础。在数值天气预报的基础上开展发电功率预报，是行业领域普遍认可的技术发展路线，但是在具体的实践中，却存在不少的差异。

美国，基础的中尺度数值天气预报一般都由专业气象机构来负责制作，技术规范、专业，对数值天气预报技术的发展也有系统性的规划，主要通过改进数值天气预报模式物理过程、提升模式空间分辨率、资料同化、集合预报、模式后处理等方面提升模式预报水平。

中国，虽然普遍认可数值天气预报的基础性地位，但尚没有一个针对风电领域应用需求的数值天气预报技术发展的国家总体目标和实施主体，更无系统的发展计划。

* + 1. **效果评价体系**

关于风电预报水平的提高，美国更多关注概率预报、极端天气事件预报和爬坡预报。与此相对应，他们在预报效果评价中也不是简单的以预报误差来评判预报效果，因为预报误差受很多因素的影响，采用一个简单的误差指标很难对预报效果进行客观评价。美国专家认为，对转折性天气、极端爬坡天气等“变化”的预报更加重要。例如，美国中西部独立系统运营机构（MISO）在风能预报评价中，除了采用平均相对误差指标外，还采用峰值出现时间和谷值出现时间两个指标来衡量预报效果。

中国，虽然风电功率预报已全面开展，但预报产品并没有在电网调度中得中国，主要采用准确率、合格率和上报率三个指标进行预报效果评价，评价指标比较粗略、单一，不尽科学、合理，对预报产品的应用和预报技术的改进缺乏推动力和指导作用。

**风电预报价值**

美国，Xcel公司在采用NCAR的数值天气预报技术（花费约500万美元）以后，预报误差从2009年的16.8%减少到了2012年的11.5%,对应增加的经济价值约为2180万美元。预报创造了经济价值。

到科学地应用，因此，风电预报产生的所价值还很难量化评价。

# 中国未来的风电预报体系

在对比分析国内外风电预报技术现状基础上，遵循数值天气预报技术发展的客观规律，本着充分发挥社会各部门优势，统筹集约，互补共享，快速、持续地推进我国风电预报技术发展的基本原则，提出了中国未来风电预报体系由“基础技术研究和公共服务”、“市场化服务”和“风电预报应用”三个部分构成（见图4）。各个部分有明确的任务分工和比较清楚的界限，各个部分之间又相互关联。



图4 中国未来风电预报体系构想

## 基础技术研究

承担基础技术研究的机构，应具备持续进行数值预报模式技术研发的专业人才队伍和硬件条件，了解、掌握数值预报领域的国际先进技术，并具有长期积累的科研基础和实践经验。主要任务包括：

（1）自主研发针对风电预报应用的全球和中尺度数值预报模式技术、资料同化技术、集合预报技术等；

（2）引进国际先进的中尺度数值预报技术，并进行本地化应用开发；

（3）研发风电预报行业普遍需求的关键技术。

## 公共服务支撑

承担公共服务支撑的机构，应具备长期、稳定地提供针对风电预报应用的数值天气预报公共服务产品的专业化人才队伍，具备雄厚的软、硬件条件，可长期、稳定地运行各类先进的全球和区域数值预报模式，并可实时获取全国或区域气象探测资料以满足数值模式实时同化的需求，不断提高数值天气预报产品的准确性，为用户提供稳定、高质的公共数值预报服务。

公共服务支撑包括：各类（气象、发电、调度等）观测和实际运行数据、区域或全国尺度的高分辨率数值天气预报数据和产品、可操作性强的相关技术规范标准等。

公共服务支撑的机构主要任务包括：

（1）承接基础技术研究成果，实现业务应用的转化，并反馈业务化应用的检验效果；

（2）运行全球模式和中尺度模式，提供针对风电预报的公共服务产品。

## 市场化服务

市场化服务内容主要包括专业气象服务和风电功率预测服务，其承担主体包括国有和私营企业、基层气象部门以及高校和科研机构等。需要具备保障可业务化、稳定地接受公共服务产品，并进一步加工制作成用户适用的服务产品的专业人员队伍、相关的软件和硬件条件和技术能力。其主要任务包括：

（1）对数值天气预报公共服务产品进行解释应用，采用动力降尺度和统计订正技术对数值天气预报进行深化、细化加工。

（2）研究数值天气预报向风电功率的转换技术，开发个性化的风电功率预报系统平台

（3）提供分辨率更高的数值天气预报产品，制作提供可满足风电场或服务区域的个性化、高分辨率的风电功率预报产品。

## 风电预报应用

风电预报的应用主体，主要是风电场和电网调度机构。风电场管理者应用风电预报向电网提交发电计划，对风电场设备的维修维护进行有效安排；电网调度机构应用风电功率预报进行各区域电力调度、发电计划编制等，确保在电网安全运行前提下最大限度地接纳风电并网。风电预报应用机构承担的任务包括：

（1）风电场和电网部门需要安装运行可满足各自生产运行需求的风电功率预报系统；

（2）风电场需承担风电场气象塔观测数据、风机轮毂测风数据和风电机组运行数据的采集，并按期向数值天气预报公共服务和风电功率预测服务机构提供，为风电功率预报效果检验、进一步研发和提高风电预报技术提供基础支持。

（3）电网调度机构承担将风电功率预报在电网调度中的业务化应用，研发高效应用风电预报来提高风电消纳比例的新技术；

（4）电网调度机构（和行业认可的第三方机构）承担各类风电预报产品质量检验，定期公布客观检验结果。

# 附件

（1）风电功率预报

以风电场的历史功率、历史风速、地形地貌、风电机组运行状态等基本信息，采用数学方法（统计、物理或者其他方法）预报风电场未来的有功功率，并将预测结果上报到电网调度机构。

（2）数值天气预报

根据大气的实际状况，在一定的初值和边值条件下，通过数值计算，求解描写天气演变过程的流体力学和热力学方程组，得到未来的天气状况数据。

（3）风能数值天气预报

为风电功率预测提供气象要素预报的数值天气预报。通常采用中尺度数值天气预报模式，以全球大气环流模式格点资料和气象站观测资料作为预报初值，在预报时间尺度范围内，每隔15分钟或1小时预报输出距地面200m高度以下任意高度的风向、风速、温度、气压等气象要素，为风电功率预测提供初始气象条件。

（4）风电功率预报系统

进行风电功率预报的系统平台。系统平台包括硬件（桌面计算机、服务器等）、软件平台（系统软件、预报模型、数据库、数据接口等）及风能数值天气预报三个部分。其中，硬件是基础，软件平台主要实现“风”到“电”的转换和上报，数值天气预报是功率预报的技术和核心。