

林智琛,陈晓梦,李白良,等.福建省沿海风电场短时预报风速的订正[J].气象与环境科学,2023,46(1):23-31.

Lin Zhichen, Chen Xiaomeng, Li Bailiang, et al. Revision of Short-time Wind Speed Forecast in Fujian Coastal Wind Power Plant[J]. Meteorological and Environmental Sciences, 2023, 46(1): 23-31.

Doi:10.16765/j.cnki.1673-7148.2023.01.004

福建省沿海风电场短时预报风速的订正

林智琛,陈晓梦,李白良,谢 嫔

(福建省气象服务中心,福州 350001)

摘 要: 为了进一步提高福建沿海风电场短时风速预报的准确性,以福建沿海某测风塔2017年9月、10月和2018年1月、4月的数据为例,通过对预报因子的筛选,设定3种不同的卡尔曼滤波量测方程方案,对ECMWF模式的预报风速进行订正,并通过误差分析来构建福建沿海风电场短时(0—12 h)预报风速的订正模型。结果表明,方案2(以地面风速和海平面气压作为预报因子)适用于风速变化较小的秋冬季节,方案1(以地面风速作为预报因子)和方案3(以地面风速、海平面气压、地面温度、地面湿度作为预报因子)对风速突变较频繁的春夏季节的预报风速订正更有效。经过订正模型订正后,各代表月在未来0—12 h预报风速的平均绝对误差和均方根误差都有显著的减少。从订正效果来看,卡尔曼滤波法存有一定局限性,风速变化越平缓其订正效果越好,同时在风速突变较大时易造成较大的误差,产生反相位订正结果。

关键词: 卡尔曼滤波;风速订正模型;误差分析

中图分类号: P456

文献标志码: A

文章编号: 1673-7148(2023)01-0023-09

引 言

风电作为可再生清洁能源的一种,近年来正逐渐受到各领域的重视。为了使风电有效地并入电网中使用,许多学者针对如何提高风功率预测水平展开了研究^[1-3]。风速的预测是风功率预测的基础,准确的风速预报是有效提高风电功率预测水平和风电消纳能力的重要措施之一。其中对于风电场电能质量控制和功率平衡、调度起到直接影响的是短期风速的预测(72 h以内)^[4-5]。由于风速的瞬时性、脉动性等特点及预报技术局限性的影响,需要在预报结果的基础上加以订正,从而提高风速预报的准确率。

近几年来国内外的诸多学者运用了许多方法对预报风速进行了订正研究。常用的风速订正方法主要分为三个大类:物理法、统计法和学习法^[6-7]。其

中卡尔曼滤波法作为统计法中的一种,被应用得较为广泛,国内已有一些学者使用其进行风速订正,修正后的结果与实测风速更为接近^[8-12]。卡尔曼滤波法是一种递推式的滤波方法,优点是能适应模式的变化,所需的历史资料较短。其主要是在量测方程的基础上通过前一时次的预报误差来修正方程系数从而推算下一时次的预报量,因此量测方程的建立是卡尔曼滤波的关键。由于建立原始量测方程的历史资料较少,一般方程中的预报因子数不宜超过4个^[13]。

受台湾海峡的狭管效应影响,福建沿海风力资源丰富,风电场也多数分布于沿海地区^[14]。为了进一步提高福建沿海风电场的风速预报水平,本文将福建中部沿海某测风塔为例,根据不同的预报因子,设计3种量测方程方案,并通过误差分析,对订正效果进行比较,同时在此基础上构建福建省沿海

收稿日期:2020-07-27;修订日期:2021-09-06

基金项目:国家重点研究发展计划项目(2018YFC1506905)

作者简介:林智琛(1993-),女,福建南安人,工程师,硕士,从事气象服务工作. E-mail:zhichen_lin@126.com

通信作者:李白良(1971-),男,湖南湘乡人,高级工程师,学士,从事专业气象服务工作. E-mail:bailiang_li@163.com

风电场短时(0—12 h)预报风速的订正模型。

1 资料选取和方法介绍

1.1 资料选取

本文所选用的资料包括实况资料和预报资料。其中实况资料是来自福建中部沿海某测风塔2017年9月—2018年5月70 m 高度层轮毂附近的实测风速,时间分辨率为1 h。预报资料为2017年9月—2018年5月 ECMWF 数值预报产品的格点资料,包括地面风速、地面气温、地面湿度和海平面气压,时间分辨率为3 h,空间分辨率为 $0.125^\circ \times 0.125^\circ$ 。在分析时将测风塔四周的格点资料通过双线性插值法插值至测风塔位置。本文的风速订正仅针对轮毂高度70 m 处进行。

1.2 订正方法介绍

卡尔曼滤波递推算中用来描述滤波器核心的主要是状态方程和量测方程。在递推过程中以线性无偏最小均方差估计准则,对滤波器的状态变量作出最佳估计,从而求得滤掉噪声的有用信号的最佳估计^[9]。状态方程和量测方程为:

$$\beta_t = \Phi_{t-1}\beta_{t-1} + w_{t-1} \quad (1)$$

$$Y_t = X_t\beta_t + v_t \quad (2)$$

其中 $\beta_t = [\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_m]^T$ 为状态向量, Φ_{t-1} 为状态转移矩阵, w 为输入噪声, $Y_t = [y_1, y_2, \dots, y_m]^T$ 为测量向量即预报量, X_t 为预报因子矩阵, v 为状态量测噪声。在天气预报中通常假定 Φ 为单位矩阵^[15],且 W 和 V 都是互不相关、均值为零,方差为 w 和 v 的独立白噪声。

基于状态方程和量测方程,利用最小二乘法可得到卡尔曼滤波的递推方程组:

$$\hat{Y}_t = X_t \hat{\beta}_{t-1} \quad (3)$$

$$R_t = C_{t-1} + W \quad (4)$$

$$\sigma_t = X_t R_t X_t^T + V \quad (5)$$

$$A_t = R_t X_t^T \sigma_t^{-1} \quad (6)$$

$$\hat{\beta}_t = \hat{\beta}_{t-1} + A_t (Y_t - \hat{Y}_t) \quad (7)$$

$$C_t = R_t - A_t \sigma_t A_t^T \quad (8)$$

在以上递推方程组中, $\hat{Y}_t$ 和 Y_t 分别为 t 时刻的预报值和观测值, X_t 为预报因子, $\hat{\beta}_{t-1}$ 为状态向量的估计值, R_t 为 $\hat{\beta}_{t-1}$ 外推值的误差方差阵, C_{t-1} 为 $\hat{\beta}_{t-1}$ 外推值的误差方差阵, X_t^T 为 X_t 的转置矩阵, A_t 为其增益矩阵, σ_t^{-1} 为 σ_t 的逆矩阵。 W 和 V 分别为对角矩阵和量测噪声方差矩阵。在实际订正中只需将预

报时次的预报值带入到更新的量测方程中,即可得相应时次的订正风速。

1.3 评价指标

评判订正风速准确率的方法有很多种^[16-18]。本文将采用平均绝对误差 (Mean-Absolute-Error, MAE) 和均方根误差 (Root-Mean-Square-Error, RMSE) 来评判各订正方案的订正效果。平均绝对误差和均方根误差计算公式分别为:

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |P_{ai} - P_{ki}| \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (P_{ai} - P_{ki})^2}{N}} \quad (10)$$

式中 N 为样本序列长度, P_{ai} 和 P_{ki} 为第 i 个样本的预报值和观测值。订正后平均绝对误差和均方根误差值越小时,订正效果越好。

2 订正方案的设计

福建省沿海地区秋冬季节风速日变化较小,而春夏季节日变化较大^[19]。以3 m/s 的风速差大小作为突变阈值,2017年10月的风速突变比例为6.45%,而2018年4月风速突变比例为17.92%。在福建沿海及海岛地区,大风天气有很强的季节性,整体而言秋冬季节的风速要大于春夏季节的风速^[20]。因此本文在构建订正模型时,分为秋冬季(10月—次年2月)和春夏季(3—9月)进行探讨。通过计算2017年9月至2018年5月各月的平均风速和极大风速,发现2017年10月的平均风速和极大风速最大,分别为13.03 m/s 和26.23 m/s;2018年4月的平均风速最小,为6.86 m/s,极大风速为第二小,达到16.19 m/s。2017年9月和2018年1月的平均风速分别为6.89 m/s 和11.30 m/s,突变比例分别为12.61%和7.66%,均为春夏季和秋冬季中等水平。为了使研究结果更为合理可靠,本文同时选取2017年9月、10月和2018年1月、4月分别作为夏季、秋季、冬季、春季四个季节的代表月来进行短时(0—12 h)预报风速的订正。

本文通过选择不同的预报因子来制定3种不同的订正方案,同时分别以2017年9月的前两个星期,9月至10月第一个星期和2017年12月至2018年1月第一个星期,以及2018年3月至4月第一个星期的观测数据和模式预报数据作为卡尔曼滤波递推的初始参数。

2.1 方案1

比较2017年9月至2018年5月测风塔轮毂的

观测风速与各预报要素的相关性(表1),可以看到地面风速与观测风速的相关系数最大,其次是海平面气压,地面气温和地面湿度与轮毂风速相关性较小且呈负相关。

表1 轮毂观测风速(70 m)与各预报要素的相关系数

预报要素	地面风速	海平面气压	地面气温	地面湿度
观测风速	0.922	0.418	-0.242	-0.323

由于轮毂风速与地面风速相关系数最大,方案1中将地面风速作为预报因子,以地面风速和实测风速的误差作为量测方程的输出项。根据 Galanis 等的研究,预报误差可用一个关于预报风速的三阶多项式表示^[8,21-22]:

$$y_t - x_t = \beta_{0,t} + \beta_{1,t}x_t + \beta_{2,t}x_t^2 + \beta_{3,t}x_t^3 \quad (11)$$

上式为方案1的量测方程,其中量测方程输出的是订正后 t 时刻的预报误差,状态向量

$$\beta_t = [\beta_{0,t} \ \beta_{1,t} \ \beta_{2,t} \ \beta_{3,t}]^T$$

观测矩阵

$$X_t = [1 \ x_t \ x_t^2 \ x_t^3]$$

其中 x_t 为 t 时刻的预报地面风速。

2.2 方案2

在风速订正方面不少学者选用风速和气压作为预报因子来建立量测方程^[9,10]。方案2中剔除温度和相对湿度等相关性较小的因素,以地面风速和海平面气压建立量测方程:

$$y_t = \beta_{0,t} + \beta_{1,t}x_{1,t} + \beta_{2,t}x_{2,t} \quad (12)$$

方案2的量测方程输出的 y_t 为 t 时刻订正后的预报风速,状态向量

$$\beta_t = [\beta_{0,t} \ \beta_{1,t} \ \beta_{2,t}]^T$$

观测矩阵

$$X_t = [1 \ x_{1,t} \ x_{2,t}]$$

其中 $x_{1,t}$ 和 $x_{2,t}$ 为 t 时刻的预报地面风速和预报海平面气压。

2.3 方案3

在其他业务的应用中,卡尔曼滤波的预报因子常用逐步回归法来选取^[13,23-25],该方法可以剔除不显著的变量从而提高方程的拟合度。通过对 ECM-WF 风速、气压、气温、相对湿度的格点数据进行逐步回归分析,发现当方程含有以上4个变量时为最佳。因此方案3的预报因子包括地面风速、海平面气压、地面气温和地面湿度,方程如下:

$$y_t = \beta_{0,t} + \beta_{1,t}x_{1,t} + \beta_{2,t}x_{2,t} + \beta_{3,t}x_{3,t} + \beta_{4,t}x_{4,t} \quad (13)$$

上式中的 y_t 为 t 时刻订正后的预报风速,状态向量

$$\beta_t = [\beta_{0,t} \ \beta_{1,t} \ \beta_{2,t} \ \beta_{3,t} \ \beta_{4,t}]^T$$

观测矩阵

$$X_t = [1 \ x_{1,t} \ x_{2,t} \ x_{3,t} \ x_{4,t}]$$

其中 $x_{i,t}$ ($i=1,2,3,4$)分别为 t 时刻的预报地面风速、预报海平面气压,预报地面气温和预报地面湿度。

3 风速订正和效果分析

针对2017年9月、10月和2018年1月、4月的风电场预报风速进行滚动订正,图1为其中10月和4月实测风速,以及不同预报时效下经过3种方案订正前后的绝对误差对比图。从图中可以看到,卡尔曼滤波法对于风速订正的效果比较显著,尤其是在当前时次,经方案2、3订正后的绝对误差接近0 m/s(图1a、c)。随着预报时效的加长,各方案的绝对误差也增大,这是因为量测方程是基于前一时次的预报误差建立的,其系数是对当前时次各预报因子的最佳估值,而随着时间的推移,方程系数对预报因子的诠释能力也逐渐减弱,从而导致了误差的增加。

从图1(b)中可以看到,在风速较大时(矩形框内),预报风速的绝对误差也较大,但通过3种方案进行卡尔曼滤波订正后绝对误差均有了显著的减小。从图1(d)中可以看到,当风速发生较大突变时(矩形框内),3种方案的绝对误差都比较大,部分时次甚至超过10 m/s。这是由于模式对风速突变的预报有着一定局限性,当预报的突变时刻与实测风速产生时差,同时量测方程系数已不是预报因子的最佳估值时,误差也将通过方程得到放大。比较图1(d)中3种方案的绝对误差曲线可以看到,方案1与实际风速的绝对误差要大于方案2、3的绝对误差。

表2为各方案 and 不同预报时效下经卡尔曼滤波法进行风速订正前后的平均绝对误差和均方根误差。可以看到,在订正前,10月预报风速的平均绝对误差和均方根误差分别在2.935~3.393 m/s和3.423~4.167 m/s;订正后的两种误差分别降至0.005~2.357 m/s和0.012~3.120 m/s,订正效果显著。1月的预报风速经过订正后平均绝对误差和均方根误差也从2.905~2.941 m/s、3.346~3.379 m/s降至0.003~2.205 m/s和0.006~3.307 m/s。整体看来,方案2与方案3的订正效果相差不大,但整体明显优于方案1。而随着预报时效的增加,在未来6—12 h风速订正时方案3比方案2的误差增加更为明显。

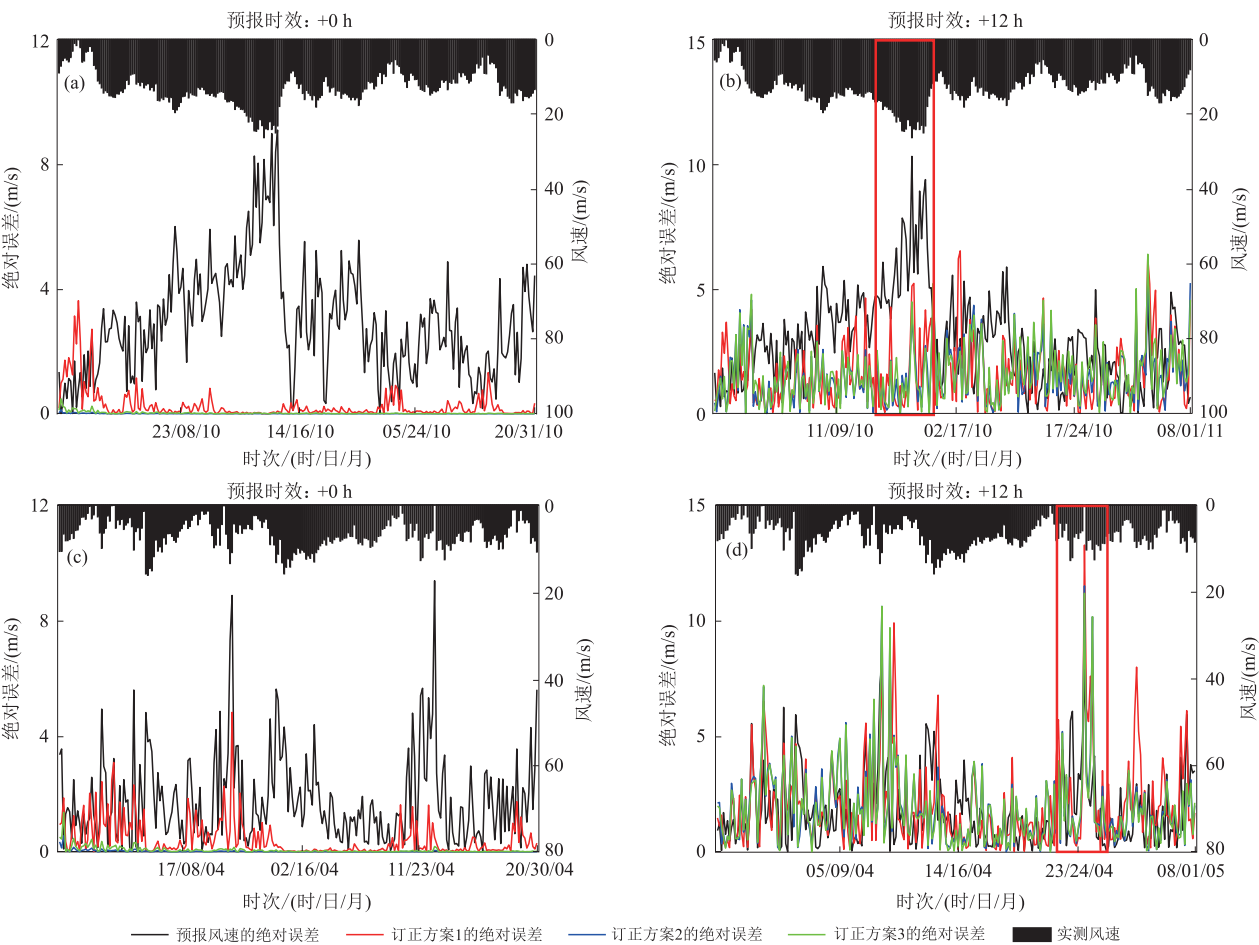


图 1 2017 年 10 月 (a、b) 和 2018 年 4 月 (c、d) 不同预报时效下 3 种方案的绝对误差曲线与实测风速的比较

表 2 各代表月风速订正前后的平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 结果 m/s

月份	方案	+0 h				+3 h							
		MAE		RMSE		MAE		RMSE					
		前	后	前	后	前	后	前	后				
9 月	1		0.711		1.169		1.404		1.872				
	2	1.816	0.001	2.367	0.005	1.818	1.514	2.368	2.084				
	3		0.000		0.000		1.559		2.082				
10 月	1		0.267		0.558		1.188		1.601				
	2	2.935	0.005	3.423	0.012	3.058	0.812	3.574	1.102				
	3		0.023		0.051		0.847		1.141				
1 月	1		0.020		0.053		1.461		2.007				
	2	2.905	0.003	3.346	0.006	2.913	1.522	3.354	2.032				
	3		0.006		0.012		1.528		2.036				
4 月	1		0.438		0.773		1.625		2.547				
	2	1.796	0.019	2.366	0.051	1.790	1.538	2.359	2.343				
	3		0.059		0.133		1.607		2.327				
月份	方案	+6 h				+9 h				+12 h			
		MAE		RMSE		MAE		RMSE		MAE		RMSE	
		前	后	前	后	前	后	前	后	前	后	前	后
9 月	1		1.728		1.992		1.860		2.223		2.125		2.636
	2	1.789	1.767	2.317	2.283	1.749	1.888	2.253	2.407	1.754	1.906	2.174	2.363
	3		1.911		2.373		2.119		2.589		2.186		2.611
10 月	1		1.724		2.228		2.064		2.657		2.357		3.120
	2	3.210	1.233	3.785	1.627	3.331	1.510	3.968	1.986	3.393	1.697	4.167	2.273
	3		1.264		1.684		1.553		2.057		1.764		2.343

续表 2 各代表月风速订正前后的平均绝对误差 (MAE) 和均方根误差 (RMSE) 结果

月份	方案	+6 h				+9 h				+12 h			
		MAE		RMSE		MAE		RMSE		MAE		RMSE	
		前	后	前	后	前	后	前	后	前	后	前	后
1 月	1		1.653		2.246		1.918		2.756		2.205		3.307
	2	2.913	1.622	3.354	2.144	2.909	1.743	3.350	2.366	2.941	1.904	3.379	2.711
	3		1.623		2.144		1.747		2.374		1.904		2.718
4 月	1		1.774		2.758		1.904		2.908		2.059		2.837
	2	1.790	1.807	2.360	2.466	1.805	1.771	2.371	2.473	1.774	1.913	2.374	2.593
	3		1.796		2.456		1.730		2.447		1.882		2.559

订正前,4月预报风速的平均绝对误差和均方根误差分别为1.774~1.805 m/s 和2.359~2.374 m/s,订正后,在未来0—3 h 预报风速的两种误差分别降为0.019~1.625 m/s 和0.051~2.547 m/s,订正效果显著。但未来6—12 h 预报风速的订正效果不是很理想,经各方案订正后的均方根误差都大于模式预报风速的均方根误差。在平均绝对误差方面,虽然在未来6—9 h 经过部分方案订正后预报风速的平均绝对误差略小于订正前的,但当预报时效增加到12 h 时各方案订正后的平均绝对误差已超过订正前预报风速的平均绝对误差。同样的情况也出现在9月,各订正方案对0—6 h 的风速订正效果显著,但当预报时效继续增加时,整体误差大于风速订正前的误差。

总体而言,卡尔曼滤波法对于预报风速的修正还是有一定的效果,相较于4月和9月,10月和1月的预报风速订正后误差减小得更为明显,说明卡尔曼滤波对于变化较平缓时的风速订正效果更好。

4 风速订正模型

为了对各方案的订正结果进行综合评估,本文在订正误差的基础上建立了评分模型,具体见下式:

$$Z = 100 - \frac{MAE^* + RMSE^*}{2} \times 100 \quad (14)$$

式中 MAE^* 和 $RMSE^*$ 分别表示绝对误差和均方根误差经过标准化后的值, Z 值越高代表订正效果越好,表3为具体评分结果。比较各方案的误差和综合评分结果可以看出,方案2对于当前时次的风速订正有着绝对优势,但在未来3—12 h 预报风速的订正中4个代表月的结果却不同。对于风速较大、变化较缓的10月和1月而言,方案2的整体订正效果最优,平均绝对误差和均方根误差均有显著减少。而对于风速突变较频繁的4月和9月,方案2对于当前时次的订正效果最好,但随着预报时次的增加,各方案对预报风速订正效果均已不太明显。这是由于风速突变时刻增多,突变时的误差累积导致了订正后的误差偏大。

由于3种方案在风速突变较频繁时的订正效果均不太理想,因此考虑对风速进行分段订正分析,进而建立订正模型。以3 m/s 为间隔,将2017年9月和2018年4月不同预报时次下的预报风速分为5段进行分析,并对订正结果进行综合评分,结果详见表4。

表3 不同订正方案对不同预报时次下的风速订正效果综合评分

月份	预报时效/h	订正前	方案1	方案2	方案3	月份	预报时效/h	订正前	方案1	方案2	方案3
9 月	0	0	56	100	100	10 月	0	88	100	99	0
	3	0	100	65	60		0	82	100	98	0
	6	41	100	51	0		0	74	100	98	0
	9	96	85	56	0		0	68	100	97	0
	12	100	7	62	3		0	58	100	96	0
1 月	0	0	99	100	100	4 月	0	0	73	100	97
	3	0	100	97	97		3	43	50	79	86
	6	0	95	100	100		6	76	50	37	55
	9	0	73	100	99		9	79	0	79	93
	12	2	35	100	99		12	100	0	52	61

由评分结果可知,方案2对于当前时次的订正效果最优。对于未来3—12 h 而言,在0~3 m/s 风速段中方案1综合评分均为最高,当风速大于6 m/s

时方案3的订正效果最好。在3~6 m/s 风速段中则以订正前的预报风速误差最小,这是由于风速突变时刻前后的风速多发生此风速段中,各订正方案对突变

频繁时的风速订正效果不太理想。

表 4 不同订正方案对 2017 年 9 月和 2018 年 4 月不同风速段下的风速订正效果综合评分

预报 时效/h	预报风速 区间/(m/s)	4 月综合评分				9 月综合评分			
		订正前	方案 1	方案 2	方案 3	订正前	方案 1	方案 2	方案 3
0	(0,3]	0	52	100	97	0	46	100	100
	(3,6]	0	65	100	97	0	45	100	100
	(6,9]	0	89	100	96	0	79	100	100
	(9,12]	0	98	100	99	0	97	100	100
	>12	0	99	100	99	—	—	—	—
3	(0,3]	0	100	49	50	0	100	58	70
	(3,6]	100	60	0	3	100	0	20	21
	(6,9]	0	65	58	100	70	0	27	100
	(9,12]	50	14	85	89	0	84	100	80
	>12	0	88	89	100	—	—	—	—
6	(0,3]	40	100	4	0	0	100	63	44
	(3,6]	100	0	78	73	100	49	12	0
	(6,9]	43	50	37	100	0	39	28	100
	(9,12]	61	0	84	90	0	94	70	100
	>12	0	44	100	82	—	—	—	—
9	(0,3]	9	100	0	6	28	100	36	0
	(3,6]	96	0	87	87	100	56	24	0
	(6,9]	76	0	84	100	36	30	0	100
	(9,12]	74	0	78	84	0	100	37	72
	>12	18	0	91	100	—	—	—	—
12	(0,3]	72	100	0	2	29	100	29	0
	(3,6]	100	0	43	45	100	83	30	0
	(6,9]	78	0	69	100	54	0	59	100
	(9,12]	0	40	92	100	0	38	92	95
	>12	—	—	—	—	—	—	—	—

综上,方案 2 适用于当前时次及在风速变化较平缓时的风速订正。方案 1 适用于突变较频繁且风速较小时的风速订正,而突变较频繁且风速较大时则需要引入其他预报因子来降低预报风速在量测方程中的权重,整体而言方案 3 相较于其他两个方案的订正效果更为突出。根据以上分析结果,对福建沿海风电场不同季节下的短时(0—12 h)预报风速搭建了订正

模型,详见表 5。表 6 为经该模型订正后 4 个代表月在不同预报时效下的误差值。比较表 6 与表 2 的结果可知,经过短时(0—12 h)预报风速订正模型订正后,绝对误差和均方根误差相对于单一方案的订正有了明显的减小,尤其是对于风速突变比较频繁的 4 月和 9 月。

表 5 不同季节下短时(0—12 h)预报风速订正模型

+0 h		+3 h	+6 h	+9 h	+12 h
秋冬(10 月—次年 2 月)		$y_t = \beta_{0,t} + \beta_{1,t}x_{1,t} + \beta_{2,t}x_{2,t}$			
春夏(3—9 月)	$y_t = \beta_{0,t} + \beta_{1,t}x_{1,t} + \beta_{2,t}x_{2,t}$	$y_t - x_t = \beta_{0,t} + \beta_{1,t}x_t + \beta_{2,t}x_t^2 + \beta_{3,t}x_t^3$			$0 \leq x_t < 3 \text{ m/s}$
		不订正			$3 \leq x_t < 6 \text{ m/s}$
		$y_t = \beta_{0,t} + \beta_{1,t}x_{1,t} + \beta_{2,t}x_{2,t} + \beta_{3,t}x_{3,t} + \beta_{4,t}x_{4,t}$			$x_t \geq 6 \text{ m/s}$

注: y_t 为 t 时刻订正后的预报风速, $x_{i,t}(i=1,2,3,4)$ 分别为 t 时刻的预报风速、预报气压、预报气温和预报相对湿度, $\beta_{i,t}(i=1,2,3,4)$ 为对应系数。

表 6 经订正模型订正后 2017 年 9 月、10 月和 2018 年 1 月、4 月不同预报时效下预报风速的误差值 m/s

月份	+0 h		+3 h		+6 h		+9 h		+12 h	
	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE	MAE	RMSE
9 月	0.001	0.005	1.403	1.848	1.475	1.919	1.499	1.969	1.486	1.937
10 月	0.005	0.012	1.126	1.412	1.240	1.572	1.344	1.715	1.504	1.851
1 月	0.003	0.006	1.522	2.032	1.622	2.144	1.743	2.366	1.904	2.711
4 月	0.019	0.051	1.483	2.259	1.642	2.302	1.621	2.361	1.630	2.260

图2为经短时(0—12 h)预报风速订正模型订正后4个代表月不同时效下实测风速、预报风速和订正后风速的比较图。从图2中可以发现,卡尔曼滤波虽然对预报风速的整体修正效果显著,但从形态上看订正风速曲线在部分时次存在着趋势不一致的现象(图2a矩形框),说明卡尔曼滤波法对风速趋势的描述有一定的局限性,尤其是在风速突变的时刻易出现相反的位相,使误差增大(图2c、d矩形框)。

为了进一步验证短时(0—12 h)预报风速订正

模型的订正效果,本文使用该模型3种不同量测方程方案对2017年11月和2018年3月的风速进行了订正,图3为不同方案和模型订正前后误差折线图。从图中可以看到,使用卡尔曼滤波法进行订正后的误差均要小于订正前的,其中以经短时(0—12 h)预报风速订正模型进行订正后的误差最小,说明了该风速订正模型的有效性和可行性。同时从图中可以看出,在未来时效的预报风速订正结果中,未来3 h的订正效果相对较好。

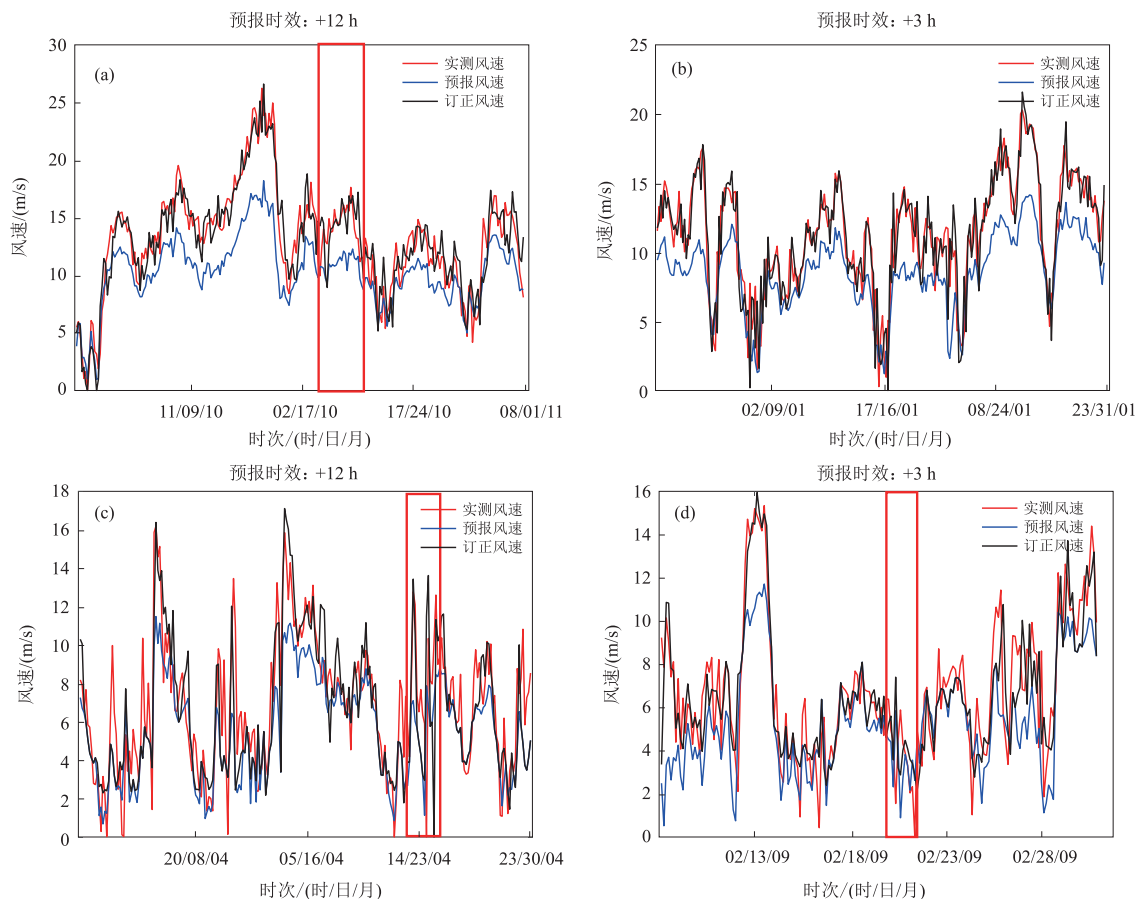
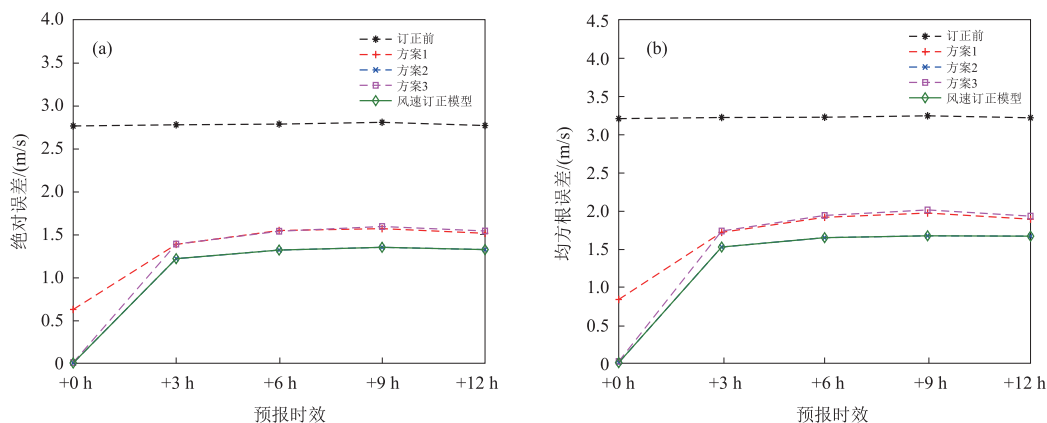


图2 各代表月不同预报时效下实测风速、预报风速和经预报风速订正模型订正后风速的比较

(a) 2017年10月, (b) 2018年1月, (c) 2018年4月, (d) 2017年9月



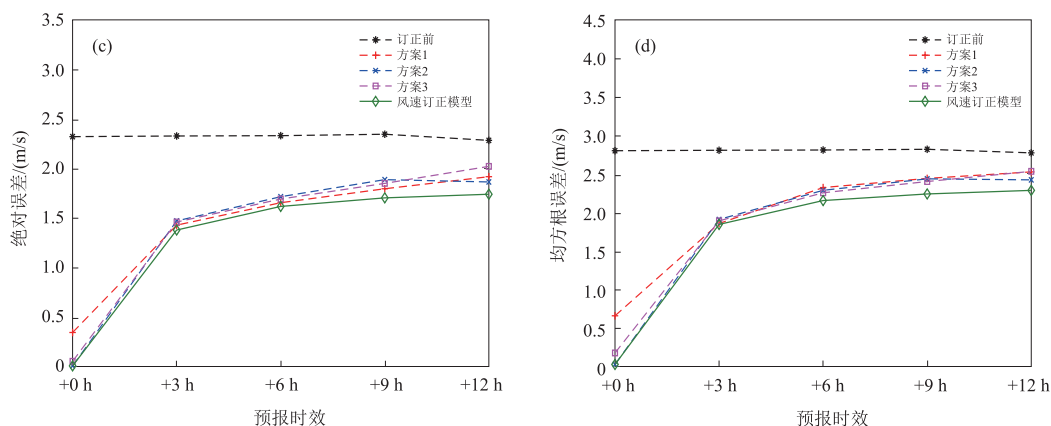


图 3 2017 年 11 月 (a、b) 和 2018 年 3 月 (c、d) 不同订正方案和风速订正模型订正前后的误差折线图

5 结 论

本文利用福建省中部沿海某风电场 2017 年 9 月—2018 年 5 月 ECMWF 数值预报格点数据和测风塔 70 m 实测数据,利用卡尔曼滤波递推订正方法对 ECMWF 数值预报风速进行订正。经过订正可以看到风速预报精度有了显著提高,误差也有效减小。

(1) 卡尔曼滤波法对于预报风速的修正有一定的效果,尤其是在大风速区和风速变化较缓时其订正效果更为显著。

(2) 通过对 3 种方案订正结果的进一步比较可知,以地面风速和海平面气压作为预报因子建立量测方程的方案 2 适用于当前时次,以及秋冬季节 (10 月—次年 2 月) 风速变化较缓时的风速订正;方案 1 则适用于风速突变较频繁的春夏季节 (3—9 月) 风速较小时刻的风速订正,而方案 3 则对风速突变较频繁且风速较大时刻的订正效果更好。

(3) 综合 3 种方案搭建的短时 (0—12 h) 预报风速订正模型订正效果优于单一方案的订正效果,且对于突变较频繁月份的预报风速订正效果更为显著。在未来时效的预报风速订正结果中,未来 3 h 的订正效果相对较好。

(4) 卡尔曼滤波递推法对风速的订正存在一定的局限性,在预报风速突变较大的时刻易产生反相位订正结果,造成较大误差。

本文在卡尔曼滤波法的基础上探讨了福建沿海地形下 0—12 h 短时风速订正,由于样本有限,本文仅对福建沿海地区预报风速的订正模型进行了初探,其方法和思路可为其他地形和更长预报时效的风电场风速订正提供参考,但还需要随着资料的累积对风速订正预报模型进行不断完善,进一步提高预报精度。

参考文献

- [1] 许杨,陈正洪,杨宏青,等. 风电场风电功率短期预报方法比较[J]. 应用气象学报,2013,24(5):625-630.
- [2] 王颖,魏云军. 风电场风速及风功率预测方法研究综述[J]. 陕西电力,2011,39(11):18-21,30.
- [3] 张飞,习佳,孙晓辉,等. 风电场功率预测技术研究进展[J]. 绿色科技,2019(18):194-195.
- [4] 严晓瑜,李剑萍,杨侃,等. 两种模式在风电场风速预测应用中的对比[J]. 干旱气象,2014,32(6):1015-1024.
- [5] 张颖超,肖寅,邓华. 基于 ELM 的风电场短期风速订正技术研究[J]. 气象,2016,42(4):466-471.
- [6] 肖寅. 基于 WRF 模式的短期风速预测及订正方法研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2016.
- [7] 陈学君,李仲龙. 超短期风速预报方法研究进展[J]. 沙漠与绿洲气象,2018,11(6):84-92.
- [8] 赵攀,戴义平,夏俊荣,等. 卡尔曼滤波修正的风电场短期功率预测模型[J]. 西安交通大学学报,2011,45(5):47-51.
- [9] 黄凤新. 基于卡尔曼滤波的复杂地形 WRF 模式预报风速订正[D]. 南京:南京信息工程大学,2013.
- [10] 李照荣,达选芳,王有生,等. 复杂地形条件下风电场预报风速的卡尔曼滤波订正[J]. 高原气象,2018,37(5):1402-1412.
- [11] 刘丽珺,梁友嘉. 集成 CFD 与 Kalman 滤波的微尺度风电场风功率预报方法[J]. 高原气象,2018,37(4):1061-1073.
- [12] 贺哲,布亚林,王蕊. 用卡尔曼滤波方法制作河南省冬半年大风预报[J]. 河南气象,2002(1):12-13.
- [13] 单铁良,董羽仑,黄金萍. 卡尔曼滤波方法预报因子的选择[J]. 河南气象,2001(1):16-17.
- [14] 黄银华,刘峻,张世钦,等. 福建沿海风电出力相关性和平滑性分析[J]. 能源与环境,2015(3):13-16.
- [15] 黄嘉佑,谢庄. 卡尔曼滤波在天气预报中的应用[J]. 气象,1993(4):3-7.
- [16] 江滢,李忠,侯佑华,等. 风电场风速和风电功率预报准确率评判方法[J]. 科技导报,2012,30(36):66-71.
- [17] 刘丽珺,梁友嘉. BJ-RUC 模式的低层风场预报产品质量检验——以甘肃省当金山风电场为例[J]. 干旱气象,2016,34(4):743-751.
- [18] 李淑娟,于晓晶,琚陈相,等. DOGRAFS 温度和风场的预报检验

- [J]. 沙漠与绿洲气象, 2014(6):1-9.
- [19] 朱伟强. 福建省沿海风力资源特性分析[J]. 电力勘测设计, 2006(1):33-36.
- [20] 林新彬, 刘爱鸣, 林毅, 等. 福建省天气预报技术手册[M]. 北京:气象出版社, 2013.
- [21] Galanis G, Louka P, Katsafados P, et al. Applications of Kalman filters based on non-linear functions to numerical weather predictions [J]. *Annales Geophysicae*, 2006, 24(10):2451-2460.
- [22] Galanis G, Louka P, Siebert N, et al. Improvements in wind speed forecasts for wind power prediction purposes using Kalman filtering [J]. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 2008, 96(12):2348-2362.
- [23] 单九生. 卡尔曼滤波原理及其因子选取和初值确定[J]. 江西气象科技, 1998, 21(4):10-13.
- [24] 高安春, 申培鲁. 利用 MM5 模式输出产品制作空气质量预报方法探讨[J]. 气象科学, 2007, 27(1):57-62.
- [25] 咸云浩, 张恒德, 谢永华, 等. 多元逐步回归与卡尔曼滤波法在霾预报中应用[J]. 系统仿真学报, 2018, 30(4):1482-1489.

Revision of Short-time Wind Speed Forecast in Fujian Coastal Wind Power Plant

Lin Zhichen, Chen Xiaomeng, Li Bailiang, Xie Pin

(Fujian Meteorological Service Center, Fuzhou 350001, China)

Abstract: To improve the accuracy of short-term wind speed prediction in Fujian coastal wind power plant, four sets of wind data collected by one wind measuring tower in September 2017, October 2017, January 2018 and April 2018 are used in this paper to revise the ECMWF wind speed forecasts through selecting predictors and setting up three different Kalman-filter schemes. Besides, the error analysis is used to construct the correction model for the short-term (0—12 h) wind speed forecast in Fujian coastal wind power plant. The result shows that Scheme 2 (taking the surface wind speed and sea-level pressure as predictors) is suitable for autumn and winter when wind speed changes little, while Scheme 1 (with surface wind speed as predictor) and Scheme 3 (which has sea-level pressure, surface wind speed, temperature and humidity to be predictors) are more effective in correcting wind speed forecast in spring and summer when wind speed changes more dramatically. After the model's revision, the mean absolute error and root mean square error of the forecast wind speed in the next 0—12 h of each representative month are significantly reduced. Judging from the correction effect, the Kalman-filter method has some limitations. When the wind speed changes more gently, the correction effect is more accurate. At the same time, when the wind speed suddenly changes, Kalman-filter is prone to generate large errors, resulting in out-of-phase correction results.

Key words: Kalman-filter; wind speed revised model; error analysis