

# 复杂下垫面风电场风速垂直外推方法研究

刘 霄, 赖 旭

(武汉大学水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072)

**摘 要:**以复杂下垫面风电场风速垂直外推方法为研究对象,分析复杂下垫面风电场风廓线受影响的成因,认为大气稳定度、地形以及粗糙度对风廓线存在显著影响,然后选取风向与大气稳定度分类参数对各影响因素进行量化。在此基础上以支持向量回归为工具,提出考虑各影响因素的风速垂直外推方法,并以中国中部复杂山区风电场为例验证所提出的方法。将外推结果与传统方法进行对比,结果表明所提出的方法各评价参数均优于规范推荐的风切变指数方法,其计算出的风速偏差、绝对风速偏差、均方根误差以及发电量偏差分别降低79%、11.7%、20.2%以及81.6%,相关系数提高0.4%,说明该方法能有效提高风速垂直外推准确性、降低风电项目建设风险。

**关键词:**风力发电;陆上风电场;支持向量机;风速垂直外推;大气稳定度;下垫面

**中图分类号:** TK81

**文献标志码:** A

## 0 引 言

风能资源是决定风电场发电量的重要因素,发电量关系到项目效益,而项目效益在很大程度上决定了项目的风险和成败。风电项目评估方法依赖于现场观测资料:以风力机轮毂高度处风速为基础进行风电机组的发电量计算,进而完成项目评估。目前随着大叶轮、高塔筒风电机组的广泛应用,越来越多的风电场现场观测资料在垂直高度上并未达到风电机组轮毂高度,需进行风速垂直外推。根据已有研究成果,风速垂直外推对风能评估影响重大,最大可导致的评估误差达到49.6%<sup>[1]</sup>。因此一个准确高效的风电场风速垂直外推方法对于提高风电场发电量评估准确性、降低风电项目建设风险具有重要意义。

针对风电场风速垂直外推方法的研究已有大量成果,基本思路均可归结为:采用合适的方法拟合近地面风廓线,将低层高度风速资料外推至所需高度。目前的研究主要集中在拟合风廓线的方法:1)对数线性律<sup>[2-3]</sup>基于莫宁-奥布霍夫相似性理论<sup>[4]</sup>,这是具有物理意义的方法,既考虑了近地面的动力因素又考虑了热力因素;2)对数律<sup>[5-6]</sup>是在中性大气稳定条件下对对数线性律进行简化得到的,适用于近地面的30~50 m以及平坦地形;3)指数律<sup>[7-12]</sup>是规范推荐的方法,其应用最为广

泛,在工程应用中展现了其适用性,已有研究产生了大量成果:徐宝清等<sup>[12]</sup>对比了5种不同的风切变指数计算方法,认为应结合风电场实际情况综合采用各方法;彭怀午等<sup>[9]</sup>对比了各风切变指数计算方法后认为分速度段计算的不同高度层的风切变指数精度较高;Gaultier等<sup>[11]</sup>在风速垂直外推问题上对比了基于指数法的直接推算风速与推算威布尔分布参数2种方法,认为采用直接推算风速的方法更为有效。研究者对对数律、对数线性律以及指数律方法的推算效果进行了对比<sup>[7]</sup>,发现指数律的推算精度优于其他2种方法。

已有方法在目前的工程应用中均存在一定的不足。对数律与对数线性律方法精度不如指数律方法,且所需的参数(温度梯度)在目前的实际风电工程中难以满足<sup>[13]</sup>;指数律是目前精度较高且应用最广泛的方法,但随着中国风电开发越来越集中在复杂下垫面区域,近地面风廓线受地形、粗糙度以及大气热稳定性等影响更为显著,这些因素进而显著影响风速垂直外推精度,已有的基于指数律的风速垂直外推方法并未考虑上述影响因素。

为更好地解决复杂下垫面风速垂直外推问题,需考虑风廓线的影响因素(动力因素、热力因素)。将各影响因素相对应的参数引入到垂直外推方法中,垂直外推问题转化为复杂非线性回归问题,支持向量回归<sup>[14-16]</sup>是被

收稿日期:2017-12-11

基金项目:国家自然科学基金(51379159);高等学校博士学科点专项科研基金(20130141130001)

通信作者:赖 旭(1966—),男,博士、教授、博士生导师,主要从事水电站过渡过程及风力发电技术方面的研究。laixu@whu.edu.cn

广泛应用和证明的适用于非线性回归问题的机器学习算法,其基于结构风险最小化原则,采用引入核函数的方法将非线性数据的低维输入空间映射到高维特征空间,并将回归问题简化为二次凸函数优化问题,保证了全局最优解的求取与良好的泛化能力。因此本文采用支持向量回归处理风速垂直外推问题。首先对复杂下垫面风电场风廓线受影响的成因进行分析,并量化各影响因素,然后采用支持向量回归作为工具建立考虑各影响因素的风速垂直外推模型,进而提出基于支持向量回归的风电场风速垂直外推方法,并以国内某复杂下垫面测风塔观测数据为例验证其有效性。

## 1 近地面风廓线影响因素分析

### 1.1 风廓线受影响的成因

在风力机轮毂高度与叶片长度之和的高度范围内大气直接与风电机组发生作用,目前实际工程中该值约为 150 m,该层次属于大气边界层。大气边界层的运动形式主要是湍流运动,主要物理过程是湍流运动引起的各种物理量的湍流交换与输送,这种交换与输送决定了边界层内各变量的空间分布与时间变化,因此风速的垂直高度上空间分布由湍流运动决定。影响边界层湍流运动的因素包括动力因素与热力因素<sup>[17]</sup>。

动力因素又称机械湍流,是纯粹由机械运动形成的。贴近地表的薄层内空气运动速度为零,零风速导致在边界层内必然存在  $\partial u / \partial z$  极大的区域,根据流体力学的混合长度理论,  $\partial u / \partial z$  越大,则由流点垂直位移形成的扰动速度  $u'$  越大,即越易形成湍流。根据机械湍流的成因可发现,不同下垫面粗糙度和地形显著影响机械湍流的形成与发展,下垫面复杂程度与风廓线的关系示意图见图 1<sup>[17]</sup>。对于复杂下垫面情况,机械湍流发展更为充分,使得其对于风廓线的影响变得十分显著,忽略机械湍流影响会显著增加风廓线拟合误差。热力因素又被称为热力湍流,是由大气温度层结形成的湍流。地表与大气的辐射特性存在差异,在白天,地表吸收辐射增温强烈,在地表与大气间形成一个强的超绝热的温度梯度,对做向上(向下)垂直运动的气块形成正(负)的净浮力,使垂直运动加速,加剧湍流运动,此时温度层结不稳定;夜间,地表因长波辐射而剧烈降温,产生与白天相反的现象,此时温度层结稳定。大气温度层结的稳定程度与风廓线的关系示意图 2<sup>[17]</sup>。对

于复杂下垫面情况,地表的辐射特性更为复杂多变,使得热力湍流更为充分发展,对于风廓线的影响更为显著。

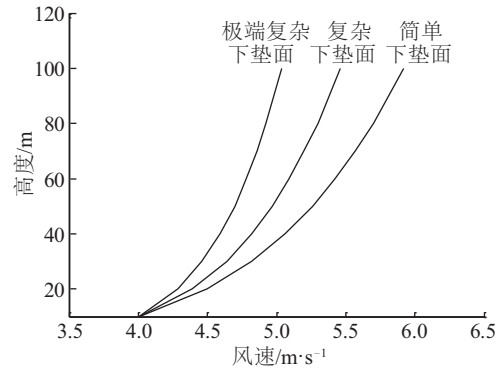


图1 下垫面复杂程度与风廓线形状关系示意图

Fig. 1 Relationship between underlying surface complexity and shape of wind profile

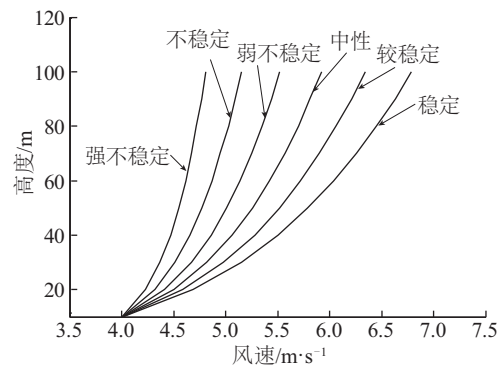


图2 大气稳定层结稳定程度与风廓线形状关系示意图

Fig. 2 Relationship between atmospheric stability and shape of wind profile

### 1.2 影响因素的量化

为在数学模型中考虑上述的影响因素,需选各影响因素的代表参数并进行量化,以便输入该模型。机械湍流受下垫面复杂程度显著影响,在风速垂直外推问题中,下垫面复杂程度是风向的函数,可用风向参数(16 风向扇区形式)对其进行量化。热力湍流与大气的温度层结稳定程度密切相关,大气稳定度分类参数很好地表征了温度层结的稳定程度,可采用大气稳定度参数对其进行量化。

## 2 复杂下垫面风速垂直外推方法

### 2.1 方法与计算流程

为提高复杂下垫面情况下风速垂直外推精度,需考虑影响风廓线的各因素,首先对各影响因素进行量化,

然后构建输入模型的训练与预测数据组,再基于支持向量回归建立数学模型,最后进行风速的垂直外推。本文提出方法分为训练阶段与预测阶段,方法框架图分别如图3所示。图3中 $H_{hub}$ 为轮毂高度,代表需要外推至的所需高度, $H_{hub-1}$ 、 $H_{hub-2}$ 、 $H_{hub-3}$ 分别代表测风塔轮毂高度之下1层、2层、3层高度。训练阶段(图3a中的风切变指数 $\alpha$ 是指 $H_{hub-2}$ 与 $H_{hub-3}$ 高度之间的风切变,预测阶段(图3b中风切变指数 $\alpha$ 是指 $H_{hub-1}$ 与 $H_{hub-2}$ 高度之间的风切变。

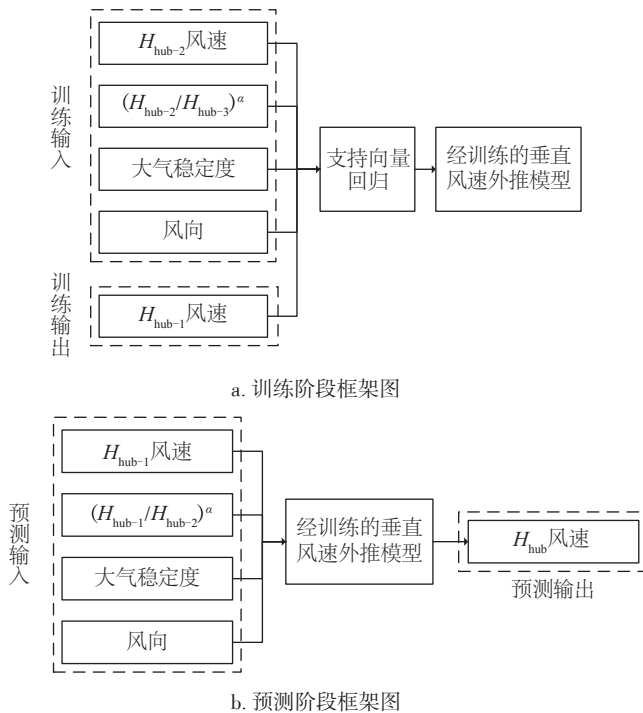


图3 本文提出模型训练/预测阶段框架图

Fig. 3 Schematic representation of training/predicting process of method proposed in this paper

方法计算步骤如下(2.2节~2.4节对应各计算步骤进行详细论述):

1)计算大气稳定度:根据水平风向脉动标准差计算逐时刻大气稳定度参数;2)构建训练与预测数据组:基于近地面风廓线指数律,构建包含风速、 $H_{hub-1}$ 与 $H_{hub-2}$ 层风速比值、风向以及大气稳定度的训练与预测数据组,并完成各参数的归一化;3)建立支持向量回归模型并预测:将训练数据组输入到基于支持向量回归的风速垂直外推模型中,完成外推模型的训练,再将预测数据组输入至训练好的模型,预测得到所需高度的风速,并进行反归一化。

## 2.2 大气稳定度的计算

目前存在的大气稳定度的分类方法有 Monin-Obukhov 长度( $L$ )、梯度理查逊数( $Ri$ )、总体理查逊数( $Rb$ )以及风向脉动标准差方法( $\sigma_A$ )等。前三者均需近地面各高层的温度数据<sup>[17]</sup>,而现实风电工程中均只在10 m高度设置一个温度传感器,使得应用受到限制。风向脉动标准差方法是基于湍流的分类方法,已有研究成果也表明其具有一定有效性<sup>[18]</sup>,并且所需参数在风电工程中均包含,因此本文采用风向脉动标准差方法来划分大气稳定度,分类标准采用1986年美国环保局推荐值<sup>[19]</sup>。本方法依据风向脉动标准差来进行大气稳定度分类,标准差的计算方法<sup>[20]</sup>为:

$$\sigma_A = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left[ D_i - \frac{1}{N} \left( \sum_{i=1}^N D_i \right) \right]^2 \quad (1)$$

式(1)中,

当 $i=1$ 时:  $D_i = \theta_i$ ,  $\theta_i$ 为方位角;

当 $i>1$ 时:  $\delta_i = \theta_i - D_{i-1}$ ;

①  $\delta_i < -180^\circ$  时,  $D_i = D_{i-1} + \delta_i + 360^\circ$ ;

②  $|\delta_i| < 180^\circ$  时,  $D_i = D_{i-1} + \delta_i$ ;

③  $\delta_i > 180^\circ$  时,  $D_i = D_{i-1} + \delta_i - 360^\circ$ 。

大气稳定度分类分为2步,先根据风向脉动标准差进行初步类别判定,再结合风速数据进行最终类别判定,分类标准见表1、表2。表1中默认粗糙长度为15 cm,实际粗糙长度与此不符时,各风向标准差需乘修正因子 $(z_0/15)^{0.2}$ ,其中 $z_0$ 是以cm为单位的实际粗糙长度。使用表1时默认的测风高度为10 m,实际测风高度与此不符时,各风向标准差需乘修正因子 $(Z/10)^{P_\theta}$ ,其中 $Z$ 是实际测风高度(单位为mm), $P_\theta$ 是P-G稳定度的函数,其取值见表3。

表1 Pasquill-Gifford大气稳定度分类初步判定表

Table 1 Initial estimate of Pasquill-Gifford stability category

风向脉动标准差	初始P-G大气稳定度
$22.5 \leq \sigma_A$	A(强不稳定)
$17.5 \leq \sigma_A < 22.5$	B(不稳定)
$12.5 \leq \sigma_A < 17.5$	C(弱不稳定)
$7.5 \leq \sigma_A < 12.5$	D(中性)
$3.8 \leq \sigma_A < 7.5$	E(较稳定)
$\sigma_A < 3.8$	F(稳定)

表2 Pasquill-Gifford大气稳定度分类最终判定表  
Table 2 Final estimate of Pasquill-Gifford stability category

时间	初步判定 P-G 大气稳定度	10 m 高度 风速/ $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$	最终判定 P-G 大气稳定度
日间	A	$u < 3$	A
	A	$3 \leq u < 4$	B
	A	$4 \leq u < 6$	C
	A	$6 \leq u$	D
	B	$u < 4$	B
	B	$4 \leq u < 6$	C
	B	$6 \leq u$	D
	C	$u < 6$	C
	C	$6 \leq u$	D
夜间	D/E/F	ANY	D
	A	$u < 2.9$	F
	A	$2.9 \leq u < 3.6$	E
	A	$3.6 \leq u$	D
	B	$u < 2.4$	F
	B	$2.4 \leq u < 3$	E
	B	$3 \leq u$	D
	C	$u < 2.4$	E
	C	$2.4 \leq u$	D
	D	ANY	D
	E	$u < 5$	E
	E	$5 \leq u$	D
	F	$u < 3$	F
	F	$3 \leq u < 5$	E
	F	$5 \leq u$	D

表3 测风高度修正参数表

Table 3 Correction factor of measure height					
P-G 稳定度	A	B	C	D	E/F
$P_\theta$	-0.06	-0.15	-0.17	-0.23	-0.38

### 2.3 训练与预测数据组的构建

本文所提出方法是基于近地面风廓线指数律的,总体思想是采用比所需高度以下一层以及两层的数据来训练支持向量回归模型,再以所需高度以下一层数据作为输入预测数据来完成风速预测。训练数据组的构建如图 3a 所示,训练数据的输入包括  $V_{H=\text{hub}-2}$  (比轮毂高度低两层风速)、 $(H_{\text{hub}-2}/H_{\text{hub}-3})^\alpha$  (基于指数律的  $H_{\text{hub}-2}$  与

$H_{\text{hub}-3}$  高度风速的比值)、风向以及大气稳定度参数;训练数据的输出为  $V_{H=\text{hub}-1}$  (比轮毂高度低一层风速)。预测数据组的构建如图 3b 所示,预测数据的输入包括  $V_{H=\text{hub}-1}$  (比所需高度低一层风速)、 $(H_{\text{hub}-1}/H_{\text{hub}-2})^\alpha$  (基于指数律的  $H_{\text{hub}-1}$  与  $H_{\text{hub}-2}$  高度风速的比值)、风向以及大气稳定度参数。风向与大气稳定性参数逐项进行归一化至  $[-1, 1]$  区间内,归一化方法计算采用:

$$y = 2 \times \frac{x - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} + (-1) \quad (2)$$

式中,  $x$  ——所需归一化的数据;  $y$  ——归一化后数据。

### 2.4 支持向量回归模型建立

在训练与预测数据组构建的基础上,给定训练与预测数据组样本  $(x_i, y_i)$ , 其中  $i = 1, 2, \dots, n$ ,  $x_i$  为输入样本,  $y_i$  输出样本,  $n$  为样本容量。考虑到多数情况下样本呈非线性关系,为达到对样本  $(x_i, y_i)$  进行线性回归,支持向量回归方法将每个样本点利用非线性函数  $\phi$  映射到高维特征空间,再在高维特征空间进行线性回归,得到回归函数  $f$  为:

$$f(x, w) = w\phi(x) + b \quad (3)$$

式中,  $w$  ——权值向量;  $b$  ——常数。

根据结构风险最小化原则,系数  $w$  和  $b$  可由最小化式(4)来估计:

$$R_{\text{emp}}(f) = \sum_{i=1}^n C(e_i) + \lambda \|w\|^2 \quad (4)$$

式中,  $R_{\text{emp}}(f)$  ——经验风险;  $\|w\|^2$  ——置信风险;  $C(e_i)$  ——损失函数。

求解式(3)可等价于以下优化问题:

$$\begin{cases} \min L = \frac{1}{2} w^T w + C \sum_{i=1}^n (\varepsilon_i^* + \varepsilon_i) \\ \text{s.t.} \begin{cases} y - [w, \varphi(X_i)] - b \leq \varepsilon_i^* + \varepsilon_i \\ [w, \varphi(X_i)] + b - y \leq \varepsilon_i^* + \varepsilon_i \\ \varepsilon_i^*, \varepsilon_i \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

为便于求解,将式(5)转化为对偶问题,可得非线性函数  $f(x)$ :

$$f(x) = \sum_{i=1}^l (\alpha_i - \alpha_i^*) K(X_i, X) + b \quad (6)$$

式中,  $\alpha_i$ 、 $\alpha_i^*$  ——支持向量参数;  $K(X_i, X)$  ——内积函数。

根据 Mercer 条件,定义核函数,本文选择径向基核函数,表达式为:

$$K(X_i, X) = \exp\left(-\frac{\|x_j - x_i\|^2}{\sigma^2}\right) \quad (7)$$

本文采用 Matlab 软件中 libsvm 软件包完成支持向



量回归模型的建立,核函数选择径向基函数,采用交叉验证的方法对松弛变量与惩罚因子寻优。

### 3 算例分析

#### 3.1 例证风电场介绍与方案

本文以中国中部某山区风场测风塔为例,对比本文提出方法与传统方法的风速垂直外推效果。测风塔位于中国中部,地形为复杂山区,下垫面为长草与灌木,测风塔位于山顶,四周开阔无遮挡;收集数据为2012年整年逐小时数据,包括风速、风向、气温、气压;原始数据完整率较高,达到90%以上,根据国家标准<sup>[21]</sup>,经数据插补后数据完整率可达100%;例证测风塔的详细参数见表4。

表4 例证测风塔详细参数表

Table 4 Description of case study

参数	例证测风塔
经纬度	31°28'14.88" 北 114°10'50.82" 东
地形地貌	复杂山区
海拔/m	605
数据时间	2012年整年
风速观测高度/m	10、30、50、60、70
风向观测高度/m	10、70
气温气压观测高度/m	10

本文选取的测风塔观测时间长、数据有效率高、无测风塔迁移与测量仪器更换、数据一致性较好,周围开阔无遮挡,平均风速约为6 m/s,具有一定的风能资源开发潜力,因此本文选取例证能较好地代表目前风电项目的普遍情况,具有一定代表性。

为进行发电量误差评估,选取目前广泛应用的商业化风力发电机组 GW-2000,其为单机容量2000 kW的变速变桨距机组,功率曲线见图4。考虑到功率曲线为机组制造商提供的离散风速-功率点,本文应用3次样条曲线进行风速-功率点的插值。例证试验方案为:如本文提出方法所述,在训练阶段,采用30、50 m高度数据作为训练输入数据,训练输出为60 m高度数据,再以60 m高度真实测风数据作为真实值进行监督学习;在预测阶段,以50、60 m高度数据作为预测输入数据,预测输出为70 m高度数据,再以70 m高度真实测风数据作为预测输出数据的真实值进行方法效果评价。

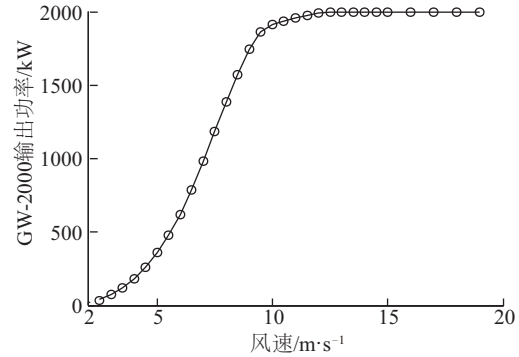


图4 例证采用的风电机组功率曲线

Fig. 4 Output power curve of the wind turbine used in case study

#### 3.2 评价指标

选取5种评价指标:风速平均偏差(MBE)、风速平均绝对偏差(MAE)、均方根误差(RMSE)、相关系数( $r$ )、发电量平均偏差(PMBE)。

$$MBE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - V_{mi})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{mi})} \quad (8)$$

$$MAE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |V_i - V_{mi}|}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_{mi})} \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (V_i - V_{mi})^2} \quad (10)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n [(V_i - \bar{V}) \times (V_{mi} - \bar{V}_m)]}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (V_i - \bar{V})^2 \times \sum_{i=1}^n (V_{mi} - \bar{V}_m)^2}} \quad (11)$$

$$PMBE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - P_{mi})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_{mi}} \quad (12)$$

式中, $n$ ——数据数量; $V$ ——推算风速; $V_m$ ——实测风速; $P$ ——推算发电量,根据推算风速与风电机组功率曲线计算得到,kWh; $P_m$ ——实测功率,根据实测风速与风电机组功率曲线得到,kWh。

#### 3.3 大气稳定度计算结果分析

测风塔大气稳定度计算结果见图5所示,各稳定度类别占比分别是A类(5.8%)、B类(2.7%)、C类(9.7%)、D类(54.4%)、E类(22.8%)以及F类(4.6%)。大气稳定度分类的日夜变化见图6。夜间大气稳定类别(包括稳定、较稳定)占比较大,日间大气不稳定类别

(包括若不稳定、不稳定以及强不稳定)占比较大。以上大气稳定度分类的规律符合测风塔所在地形地貌和区域的理论大气稳定度估计<sup>[18]</sup>,说明本文采用的大气稳定度分类方法有效。

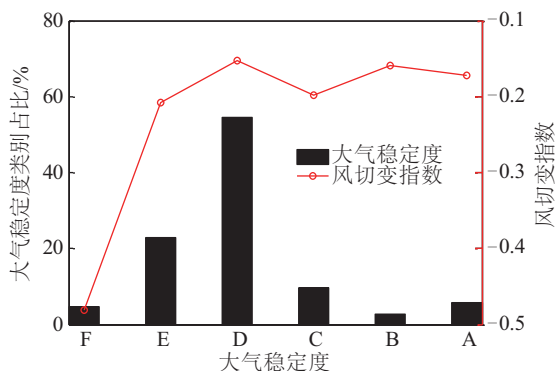


图5 测风塔大气稳定度分类及其与风切变指数的关系

Fig. 5 Relationship between atmospheric stability and wind shear coefficient

测风塔处由于地形作用存在负切变,从理论上分析,大气静稳时,上下层空气垂流流动较弱,负切变显著(风切变指数较小);大气不稳定时空气垂流流动现象反之,负切变不显著(风切变指数较大)。从图6可知,随着大气稳定度分类从稳定往不稳定方向变化,风切变指数大致呈增大趋势,符合理论分析,说明风切变指数受大气稳定度影响显著。

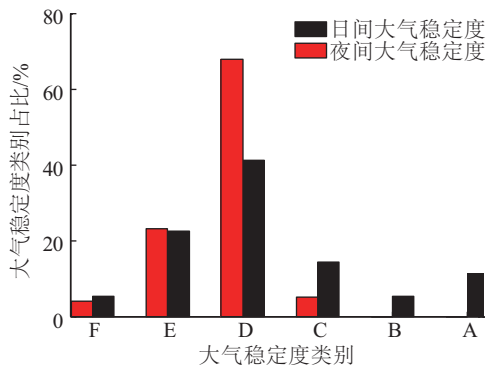


图6 测风塔大气稳定度分类的日夜变化

Fig. 6 Atmospheric stability category in day time and night time

### 3.4 垂直外推结果分析

采用2.3节中数据组的构建方法,将例证风电场数据构建成为训练与预测数据组并完成归一化,再输入到风速垂直外推模型中得到风速外推结果。为验证本文提出方法的有效性,将本文提出的方法与规范中推荐的

风切变指数方法进行对比分析。基于风切变指数的风速垂直外推采用分风向扇区推算的方法,将测风塔风速数据按照70 m高度处风向分为16扇区,对每个扇区计算风切变指数并外推至所需高度。对比结果见表5。

表5 对比分析结果表

Table 5 Evaluation metrics comparisons

评价参数	MBE/%	MAE/%	r	RMSE	PMBE/%
风切变指数法	1.20	6.32	0.987	0.576	2.66
本文	0.25	5.58	0.991	0.460	-0.49
相对提高值	79.0	11.7	0.4	20.2	81.6

从表5可看出,本文提出方法各评价参数均优于风切变指数垂直外推方法,MBE、MAE、RMSE以及PMBE分别降低79.0%、11.7%、20.2%以及81.6%,r提高0.4%。可见本文提出方法较优,能有效降低风速垂直外推误差,降低项目建设风险。

## 4 结 论

本文在近地面风廓线受影响的成因分析并量化影响因素的基础上,采用支持向量回归作为工具提出基于支持向量回归的风电场风速垂直外推方法,并以国内某复杂山区测风塔观测数据为例验证方法,得出主要结论如下:

1) 本文提出的复杂下垫面风电场风速垂直外推方法结果准确可信,能有效降低风速垂直外推误差,降低风电项目建设风险,提高工程经济性。

2) 本文所采用的大气稳定度分类计算方法符合理论稳定度分布规律,分类计算方法准确有效;风切变指数与大气稳定度类别显著相关。

3) 本文提出方法各评价参数均优于规范推荐的基于风切变指数的方法,MBE、MAE、RMSE以及PMBE分别降低79.0%、11.7%、20.2%以及81.6%,r提高0.4%。

### [参考文献]

- [1] FIRTIN E, GÜLER O, AKDAG S A. Investigation of wind shear coefficients and their effect on electrical energy generation[J]. Applied energy, 2011, 88(11): 4097-4105.
- [2] PNEUMATIKOS J D. An experimental test of the empirical formulae commonly used to represent wind speed profiles near the ground[J]. Renewable energy, 1991, 1(5-6): 623-628.
- [3] BERG V D. Wind turbine power and sound in relation to

- atmospheric stability[J]. Wind energy, 2008, 11(2): 151-169.
- [4] MONIN A S, OBUKHOV A M. Dimensionless characteristics of turbulence in the surface layer of the atmosphere[J]. Trudy Geofizicheskogo Instituta Akademiyi Nauk SSSR, 1954, 24: 163-187.
- [5] LAIRD D L, MONTOYA F C, Malcom D J. Finite element modeling of wind turbine blades [C]// Proceedings of 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, USA, 2005.
- [6] COUNIHAN J O. Adiabatic atmospheric boundary layers: a review and analysis of data from the period 1880-1972[J]. Atmospheric environment(1967), 1975, 9(10): 871-905.
- [7] IRWIN J S. A theoretical variation of the wind profile power-law exponent as a function of surface roughness and stability[J]. Atmospheric environment(1967), 1979, 13(1): 191-194.
- [8] GUALTIERI G, SECCI S. Comparing methods to calculate atmospheric stability-dependent wind speed profiles: a case study on coastal location[J]. Renewable energy, 2011, 36(8): 2189-2204.
- [9] 杜燕军, 冯长青. 风切变指数在风电场风资源评估中的应用[J]. 电网与清洁能源, 2010, 26(5): 62-66.
- DU Y J, FENG C Q. Application of wind shear index in the assessment of wind resource of wind farm[J]. Power system and clean energy, 2010, 26(5): 62-66.
- [9] 彭怀午, 冯长青, 包紫光. 风资源评价中风切变指数的研究[J]. 可再生能源, 2010, 28(1): 21-23, 28.
- PENG H W, FENG C Q, BAO Z G. Study on the wind shear exponent for wind resource assessment[J]. Renewable energy resources, 2010, 28(1): 21-23, 28.
- [10] 邓胜祥, 陈刚, 陈桂宝. 海拔1000 m以上复杂地形风能风切变指数算法比较[J]. 农业工程学报, 2015, 31(6): 218-222.
- DENG S X, CHEN G, CHEN G B. Comparison of calculation methods for wind shear exponent in complex terrain at altitude above 1000 meters[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(6): 218-222.
- [11] GUALTIERI G, SECCI S. Extrapolating wind speed time series vs. Weibull distribution to assess wind resource to the turbine hub height: a case study on coastal location in Southern Italy[J]. Renewable energy, 2014, 62: 164-176.
- [12] 徐宝清, 吴婷婷, 李文慧. 风资源评估中风切变指数的研究[J]. 电力科学与工程, 2014, 30(7): 73-78.
- XU B Q, WU T T, LI W H. Research on the wind shear exponent for wind resource assessment [J]. Electric power science and engineering, 2014, 30(7): 73-78.
- [13] BAÑUELOS- RUEDAS F, ANGELES- CAMACHO C, RIOS- MARCUELLO S. Analysis and validation of the methodology used in the extrapolation of wind speed data at different heights[J]. Renewable and sustainable energy reviews, 2010, 14(8): 2383-2391.
- [14] VAPNIK V. The nature of statistical learning theory[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2013.
- [15] 栗然, 李广敏. 基于支持向量机回归的光伏发电出力预测[J]. 中国电力, 2008, 41(2): 74-78.
- LI R, LI G M. Photovoltaic power generation output forecasting based on support vector machine regression technique[J]. Electric power, 2008, 41(2): 74-78.
- [16] 曾绍华. 支持向量回归机算法理论研究与应[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.
- ZENG S H. The theory research of algorithm on support vector regression and application[D]. Chongqing: Chongqing University, 2006.
- [17] 赵鸣. 大气边界层动力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- ZHAO M. Dynamics of atmospheric boundary layer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- [18] 康凌, 张宏升, 王志远, 等. 不同下垫面大气稳定度分类方法的对比研究[J]. 北京大学学报(自然科学版), 2011, 47(1): 66-70.
- KANG L, ZHANG H S, WANG Z Y, et al. Study on the atmospheric stability class over different surface conditions[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2011, 47(1): 66-70.
- [19] US Environmental Protection Agency. Guideline on air quality models (Revised) [M/OL]. US Environmental Protection Agency, 1986, EPA-450/2-78-027R.
- [20] MORI Y. Evaluation of several "single-pass" estimators of the mean and the standard deviation of wind direction [J]. Journal of climate and applied meteorology, 1986, 25(10): 1387-1397.
- [21] GB/T 18710—2002, 风电场风能资源评估方法[S].
- GB/T 18710—2002, Methodology of wind energy resource assessment for wind farm[S].

## ANALYSIS OF WIND SPEED VERTICAL EXTRAPOLATION METHOD OF WIND FARM LAYOUT IN COMPLEX UNDERLYING SURFACE

Liu Xiao, Lai Xu

(State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**Abstract:** In this paper, the wind speed vertical extrapolation method of wind farm in complex underlying surface is investigated. The influence factors of wind profile in complex underlying surface are analyzed. The atmospheric stability, terrain and roughness are considered to have a significant effect on wind profile. Then wind direction and atmospheric stability classification parameters are selected to quantify those influencing factors. On the basis of this, adopting support vector regression algorithm as a tool, wind speed vertical extrapolation method in complex underlying surface wind farm is proposed. And a case study of a wind power plant in the complex mountainous area of central China is used to validate the method proposed in this paper. The results are compared with traditional methods, which show that this method provide a better estimation of wind speed vertical extrapolation even if it is compared with the most widely used method which based on wind shear coefficient. The evaluation metrics are optimized by this method by which *MBE*, *MAE*, *RMSE* and *PMBE* are reduced by 79%, 11.7%, 20.2% and 81.6%, respectively, and correlation coefficient is increased by 0.4%. It indicates that the prediction errors of wind speed vertical extrapolation in complex underlying surface wind farm are effectively reduced, the accuracy of the wind resource assessment is improved and the risks of wind farm construction are reduced by using the method proposed in this paper.

**Keywords:** wind power; onshore wind farm; support vector machine; wind speed vertical extrapolation; atmospheric stability