

# 测风塔风速插补对风功率密度误差的影响分析

孙朋杰<sup>1</sup> 王彬滨<sup>2</sup> 陈正洪<sup>1</sup> 张雪婷<sup>1</sup> 许杨<sup>1</sup> 孟丹<sup>1</sup>

(1 湖北省气象服务中心, 武汉 430205; 2 中国电力建设集团四川电力设计咨询有限责任公司, 成都 610016)

**摘要:** 在风资源评估过程中, 针对缺测风速, 一般采用数理统计方法(比值法、线性回归等)进行插补, 使之达到要求, 而与之对应的风功率密度, 目前未进行检验。为验证风速插补后对应的风功率精度, 选取湖北省内2座测风塔观测资料分别代表风速观测“大风年”(2013年)及“小风年”(2014年)状况, 利用线性回归方法及比值法, 将测风塔有观测数据的8月作为缺测时段进行插补, 结果发现: 风速实测值与推算值变化趋势一致且达到要求。而与风速对应的风功率密度, 1#测风塔实测值与推算值的平均绝对百分比误差(MAPE)超过150%, 相对均方根误差(rRMSE)超过90%, 平均偏差(MBE)在 $-15.5 \sim -10 \text{ W/m}^2$ , 模拟值较实测值明显偏小, 2#测风塔风功率密度实测值与推算值的MAPE超过100%, rRMSE超过70%, MBE在 $1.9 \sim 6.3 \text{ W/m}^2$ 。因此, 在对风速缺测插补过程中, 会造成平均风速拟合误差较大, 而风功率密度差异较大的现象, 且在“大风年”插补风速对应的风功率密度较实测值偏小, “小风年”插补风速对应的风功率密度较实测值偏大。

**关键词:** 比值法, 线性回归, 风速, 风功率密度

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.012

## Analysis of the Influence of Wind Speed Interpolation on Wind Power Density Error from Wind Tower Data

Sun Pengjie<sup>1</sup>, Wang Binbin<sup>2</sup>, Chen Zhenghong<sup>1</sup>, Zhang Xueting<sup>1</sup>, Xu Yang<sup>1</sup>, Meng Dan<sup>1</sup>

(1 Hubei Provincial Meteorological Service Center, Wuhan 430205

2 Sichuan Electric Power Design Consulting Co., Ltd., Power Construction Corporation of China, Chengdu 610016)

**Abstract:** Wind assessments are conducted using mathematical statistics (ratio method, linear regression, etc.) that carry out interpolation corrections and test the effects to achieve the revised requirements. However, wind power density is not presently tested. Without wind density, the wind power assessment may impact the modelled relationships between windspeed and wind power. In order to verify the situation, we selected two wind towers within the Hubei Province, and used observation data of wind speed from a “high wind speed year” (2013) and a “low wind speed year” (2014). Data from missing periods was filled using interpolation, linear regression and ratio methods. The wind speed data from August was analyzed. The results showed that for the changes in wind speed trends, measured and calculated values were consistent with the interpolation correction. The measured wind power density and wind speed was in agreement with the calculated values. The mean absolute percentage error (MAPE) of the measured values from the tower 1 was greater than 150%; the relative root mean square error (rRMSE) was more than 90%; the average deviation (MBE) was  $-15.5 \sim -10 \text{ W/m}^2$ , indicating that the simulated value was smaller than the measured value. The MAPE, rRMSE and MBE of the measured values from the tower 2 were 100%, 70% and  $1.9 \sim 6.3 \text{ W/m}^2$ , respectively, indicating that the simulated value was larger than the measured value.

**Keywords:** ratio method, linear regression, wind speed, wind power density

### 0 引言

在对风电场风能资源评价过程中, 依据《风电场风能资源评估方法》(GB/T 18710—2002)<sup>[1]</sup>规定, 要求测风塔整理出至少连续一年完整的风场逐小时测

风数据才能进行风能资源评估(有效数据完整率应达到90%以上)。由于测风塔本身仪器故障, 或是由于测风塔倒塔、覆冰等现象, 会造成观测数据缺失。特别是在冬季的南方内陆地区, 由于复杂山地微地形的影响, 测风塔覆冰现象较为严重, 测风塔风杯和测风仪由于冰冻无法正常运转, 造成观测数据缺失几天甚至十几天的事件经常发生。因此, 对缺失的测风数据必须经过插补才能满足国家标准。

利用附近测风塔或气象站的测风数据, 通过线性回归、比值法等方法对测风塔缺测数据进行插补是目

收稿日期: 2018年6月4日; 修回日期: 2018年12月27日  
第一作者: 孙朋杰(1985—), Email: pjws@163.com  
通信作者: 陈正洪(1964—), Email: chenzh64@126.com  
资助信息: 湖北省气象局科技发展基金(QY-Y-201403);  
湖北省气象科技发展基金(2016Q11)

前普遍采用的方法<sup>[2-5]</sup>。运用这些方法,均能对缺测风速进行插补,经过验证,插补的平均风速拟合效果较好,但是涉及风功率密度的拟合效果评估方面的研究较少。

由于测风塔观测时间较短(大多只有一年甚至不足一年的观测),因为风的随机性,风速的年际变率非常大<sup>[6]</sup>,有“大风年”“小风年”“平均年”之分,湖北省已投产风电场运行结果显示:2013年为风速偏大年景,即“大风年”,2014年为“小风年”。因此,本文通过选取湖北省内2013、2014年2座测风塔风速观测资料,利用线性回归方法及比值法对风速进行模拟,进而对风速、风功率密度参数进行对比分析,对插补结果进行评估,寻找“大风年”“小风年”插补风速、对应风功率密度和实际值之间的关系,为风电企业在风电场评估、建设过程中的决策提供一定的参考。

## 1 资料与方法

### 1.1 测风塔资料概况

选取的2座测风塔分别位于湖北省大冶、随州两地,其中大冶的测风塔观测期主要在2013年,代表大风年风况,编号为1#测风塔。随州的测风塔观测期主要在2014年,代表小风年风况,编号为2#测风塔。同时,分别选取2座测风塔周边距离较近且与测风塔同期风速相关较好的测风塔作为缺失资料插补的参考塔,测风塔及参考塔详细信息见表1。

表1 选定的2座测风塔及参考塔信息

Table 1 The information for the selected two wind towers and the reference towers

风塔编号	所处区域	测风时段	仪器型号	塔高/m	海拔高度/m
1#	大冶	2013.01.01—2013.12.31	NRG	70	692
1#参考塔		2013.01.01—2013.12.31	NRG	80	677
2#	随州	2014.01.16—2015.01.15	NRG	70	381
2#参考塔		2014.01.16—2015.01.15	NRG	70	349

### 1.2 风功率密度计算方法

平均风功率密度是单位时间内气流通过与气流垂直的单位面积的风能。根据《风电场风能资源评估方法》平均风功率密度计算公式为:

$$\bar{W} = \frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n \rho_z V_i^3, \quad (1)$$

式中,  $\bar{W}$  为设定时段的平均风功率密度 ( $W/m^2$ );  $n$  为设定时段内的记录数;  $V_i$  为第  $i$  记录风速 ( $m/s$ ) 值,  $\rho$  为空气密度。

### 1.3 缺测资料插补方法

#### 1.3.1 数据质量控制

依据《风电场风能资源评估方法》(GB/T 18710—2002)及《风电场气象观测及资料审核、订

正技术规范》(QX/T 74—2007)<sup>[7]</sup>,首先对测风塔的原始数据进行合理性检验,包括范围检验、相关性检验、变化趋势检验,具体检验指标见表2。对不符合合理性检验标准的可疑数据,在分析该时次前后风速的变化趋势后,对风速较其他各层变化明显偏大,并且剔除前后变化趋势明显不一致的数据;如果该时次前后各高度同步变化,应属于合理数据,予以保留;对风速长时间显示为静风,或风速风向长时间固定的数据,一律删除。

表2 测风塔资料合理性检验项目及参数一览表

Table 2 Wind tower data rationality test project and parameter list

项目类别	主要参数	指标范围
范围	平均风速/(m/s)	$0 \leq u < 40$
	风向/°	$0 \leq w < 360$
相关性	60 m/40 m高度小时平均风速差值/(m/s)	$< 4$
	60 m/10 m高度小时平均风速差值/(m/s)	$< 8$
变化趋势	60 m/40 m高度风向差值/°	$< 22.5$
	1 h平均风速变化/(m/s)	$< 6$
	1 h平均温度变化/°C	$< 5$
	3 h平均气压变化/kPa	$< 1$

#### 1.3.2 相关系数

在对测风塔资料进行数据质量控制后,需要用邻近的测风塔或气象站对缺测和无效数据进行插补,计算观测塔各高度风速与参考站同期风速之间的相关系数,采用相关系数最高的参考站为最终参证塔(站)。

#### 1.3.3 线性回归法

用  $y_i$  表示测风塔为  $n$  的风速缺测因变量,  $\hat{y}_i$  为缺测风速的拟合值。用  $x_i$  表示  $y_i$  对应的参考塔风速值(自变量),  $y_i$  与  $x_i$  之间的一元线性回归方程为:

$$\hat{y}_i = a + bx_i \quad (i=1, 2, \dots, n), \quad (2)$$

式中,  $a$  为回归常数,  $b$  为回归系数(即倾向值)。

#### 1.3.4 比值法

认为相邻的测风塔,风速等要素的比值是稳定的,近于一个常数,可用比值稳定性来获取订正公式:

$$y_i = kx_i, \quad (3)$$

式中,  $k$  为两序列平均值的比值。

#### 1.3.5 误差检验方法

评估风速及风功率密度插补订正效果,采用下列指标作为效果指标:

1) 平均绝对百分比误差

$$MAPE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{|x_{ij} - x_i|}{x_i} \times 100\%。 \quad (4)$$

2) 相对均方根误差

$$rRMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_{ij} - x_i)^2 / x_i} \times 100\%。 \quad (5)$$

3) 平均偏差

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [x_{ij} - x_i] \quad (6)$$

2 插补结果比较

为了对风速及风功率密度的插补结果进行比较, 选取2座测风塔最高层风速(1#测风塔、2#测风塔70 m 高度)有观测数据的8月1—31日逐小时观测资料作为缺测值进行插补。

在进行插补之前, 首先分析了各测风塔与参考塔的同期风速观测资料相关性, 两测风塔最高层风速与参考塔风速相关系数见表3。从表中可以看到, 各测风塔与参考塔的同期风速相关系数均达到极显著水平, 故可以用参考塔进行插补, 运用线性回归法及比值法进行推算。

表3 两测风塔与对应参考塔的同期风速相关  
Table 3 The correlation of wind speed between the two towers

风塔编号	风速观测高度/m	同期风速相关系数	显著性检验
1#	80	0.911	0.001
1#参考塔	70		
2#	70	0.887	0.001
2#参考塔	70		

利用1#测风塔2013年8月1—31日与2#测风塔2014年8月1—31日的实测值与推算值进行对比分析, 结果见图1、图2。

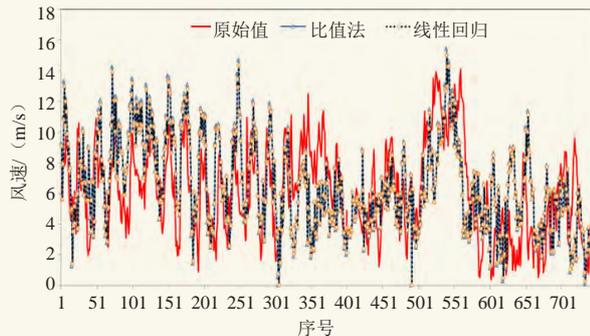


图1 1#测风塔2013年8月1—31日实测值与模拟值对比  
Fig. 1 The comparison of measured and simulated values for wind tower #1 during 1—31 August 2013

可以看到, 逐时平均风速实测值与推算值变化趋势一致且大部分情况下风速值比较接近, 对比了风速模拟效果(表4), 无论是比值法还是线性回归法, 两种方法可以达到插补的要求。

进而对两测风塔插补风速与原始风速对应的风功率密度进行比较, 结果见表5。

从对比结果可以看到, 利用周边测风塔将目标测风塔缺测资料插补后, 尽管两者风速相关较好、误差较小, 但是推算风速对应风功率密度与实测值差异较

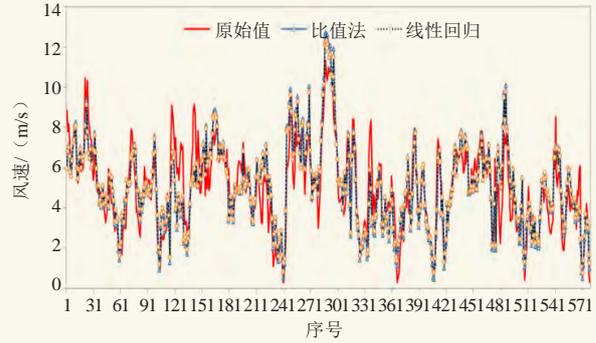


图2 2#测风塔2014年8月1—31日实测值与模拟值对比  
Fig. 2 The comparison of measured and simulated values for wind tower #2 during 1—31 August 2014

表4 两测风塔风速模拟效果比较  
Table 4 Comparison of wind speed simulation effects for the two towers

测风塔	插补方法	MAPE/%	rRMSE/%	MBE/(m/s)
1#测风塔	比值法	21.3	21.8	-0.08
	线性回归	21.2	21.9	-0.06
2#测风塔	比值法	21.3	22.0	0.08
	线性回归	22.6	21.5	0.11

表5 两测风塔模拟风速对应的风功率密度比较  
Table 5 Comparison of wind power density corresponding to wind speed simulation effects for the two towers

测风塔	插补方法	MAPE/%	rRMSE/%	MBE/(W/m <sup>2</sup> )
1#测风塔	比值法	160.2	92.7	-15.5
	线性回归	154.1	96.1	-10.4
2#测风塔	比值法	102.2	77.6	6.3
	线性回归	139.0	71.0	1.9

大。在“大风年”(2013年), 插补风功率密度较实测值偏小(1#测风塔), “小风年”(2014年), 插补风功率密度较实测值偏大(2#测风塔)。

对比两测风塔风速频率分布(图3、表6), 发现在“大风年”(2013年), 风速频率分布整体“偏右”, 即大风频率较大, 统计了1#测风塔在6 m/s以上的风速段频率占50.7%, 而在风速偏小年景(2014年), 小风频率占比较大, 2#测风塔在5 m/s以下的风速段频率占52.3%。

因此, 统计1#测风塔大风情况下、2#测风塔小风情况下推算风功率密度与实际风功率密度的差异。选定1#测风塔风速段在>6 m/s的风速段情况, 可以看到: 无论是用比值法还是线性回归法, 除个别值外, 拟合的风速对应的风功率密度大多数情况下明显小于实际风功率密度。而2#测风塔风速段在<5 m/s情况下的拟合风速对应的风功率密度较实测值明显偏大。

由此可知, 在运用比值法及线性回归法对缺测资料插补过程中, 会造成实际情况下的大风速拟合

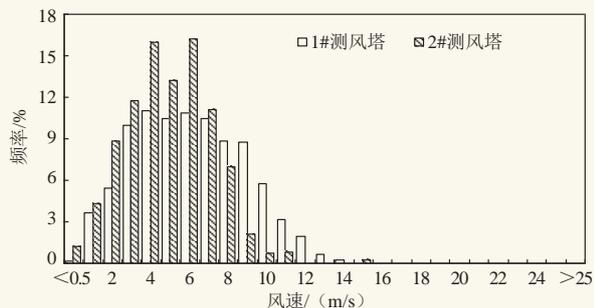


图3 两测风塔8月实测风速频率分布  
Fig. 3 Wind speed frequency distribution in August for the two wind towers

表6 两测风塔8月实测风速段频率统计 (单位: %)  
Table 6 The wind frequency statistics of the two wind towers in August (unit: %)

测风塔	≤5 m/s	5 m/s<风速<10 m/s	≥10 m/s
1#	38.0	51.4	10.6
2#	52.3	45.8	1.8

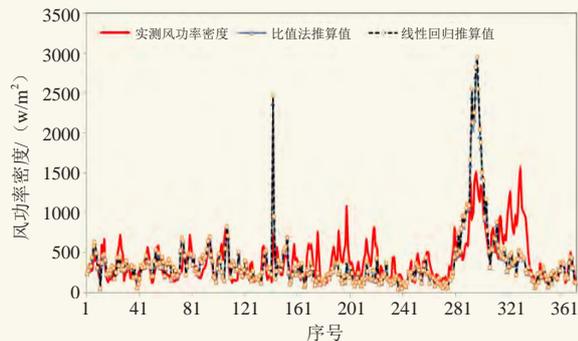


图4 1#测风塔大于6 m/s风速段实测与模拟风功率密度对比  
Fig.4 Comparison of measured and simulated wind (> 6 m/s) power density for wind tower #1

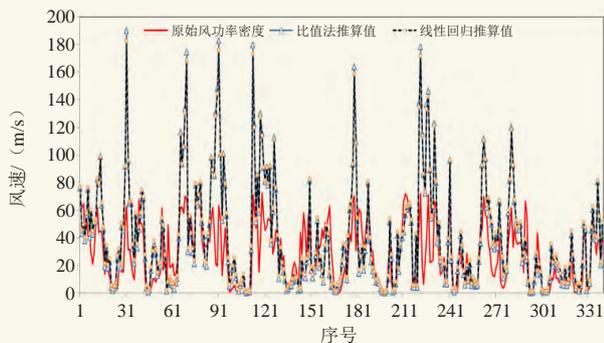


图5 2#测风塔小于5 m/s风速段实测与推算风功率密度对比  
Fig.5 Comparison of measured and simulated wind (<5 m/s) power density for wind tower #2

偏小, 而小风速值拟合偏大的状况, 由于风功率密度与风速的三次方成正比, 上述情况下, 虽然平均风速拟合误差不大, 而风功率密度差异较大。在“大风年”, 大风频率较大, 会造成插补风速对应的风功率密度较实测值偏小, “小风年”小风频率较大, 插补

风速对应的风功率密度较实测值偏大。

### 3 结论与讨论

通过选取湖北省内2013、2014年2座测风塔观测资料分别代表“大风年”及“小风年”风速观测, 为了对风速及风功率密度的插补结果进行比较。选取2座测风塔最高层风速(两测风塔70 m高度)有观测数据的8月1—31日逐小时观测资料作为缺测, 利用线性回归方法及比值法进行插补, 结果显示:

1) 1#测风塔、2#测风塔与对应的参考塔同期风速相关系数分别为0.911、0.887, 均达到极显著水平, 可用参考塔资料对缺测值进行插补。

2) 无论是线性回归法还是比值法, 逐时平均风速实测值与推算值变化趋势一致且大部分情况下比较接近, 1#测风塔和2#测风塔的MAPE和rRMSE均在20%左右, MBE在-0.08~0.11 W/m<sup>2</sup>, 达到插补的要求。

3) 1#测风塔风功率密度实测值与推算值的MAPE超过150%, rRMSE超过90%, MBE在-15.5~-10 W/m<sup>2</sup>, 模拟值较实测值偏小, 2#测风塔风功率密度实测值与推算值的MAPE超过100%, rRMSE超过70%, MBE在1.9~6.3 W/m<sup>2</sup>, 模拟值较实测值偏大; 1#测风塔在6 m/s以上的风速段范围内, 拟合风速明显小于风速实际值, 2#测风塔在5 m/s以下的风速段范围内, 拟合风速明显小于实际风速。

通过对插补的风速及对应的风功率密度进行对比分析, 发现通过比值法及线性回归法对风速进行插补后, 需要对插补的风功率密度进行进一步订正。发现在“大风年”, 大风频率较大, 会造成插补风速对应的风功率密度较实测值偏小, “小风年”小风频率较大, 插补风速对应的风功率密度较实测值偏大。本文仅选取了一个大风年和一个风年一个月进行了验证, 所得结论可能有一定的偶然性, 后期应收集多个大风年和小风年的不同样本来进一步论证所得结论。

#### 参考文献

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 18710—2002风电场风能资源评估方法. 北京: 中国标准出版社, 2002.
- [2] 张雪婷, 陈正洪, 许杨, 等. 复杂山地下测风塔缺测风数据插补订正方法的比较分析. 风能, 2015, 1: 82-86.
- [3] 程艳伟. 风电场风速订正方法的回归检验和误差分析. 内蒙古电力技术, 2016, 34(2): 39-42.
- [4] 翁笃鸣. 山区气候考察资料的订正方法和分析方法. 气象, 1985, 10: 39-43.
- [5] 甘启娣. 山区风电场测风数据订正分析. 云南水电技术, 2011(1): 55-59.
- [6] 许遐祯. 江苏省风能资源评估及开发利用的若干问题研究. 南京信息工程大学, 2011: 33-34.
- [7] 中国气象局. QX/T 74—2007风电场气象观测及资料审核、订正技术规范. 北京: 气象出版社, 2007.