

两个新参数在云南山地风电场 风能资源评估中的适用性分析

金燕 王学锋 范立张
(云南省气候中心, 昆明 650034)

摘要: 利用2011—2013年云南杨梅山风电场两个测风塔逐10 min风速资料, 计算了相当风速、有功风功率密度两个风能资源评估新参数, 并与平均风速、平均风功率密度进行对比分析, 结果表明相当风速较实测风速偏小, 风速频率分布较为集中, 能量指标更趋于实际; 有功风功率密度较平均风功率密度偏小, 其表示被风机直接利用风能密度的大小。综合分析表明, 两个新参数在云南山地风电场风能资源评估中具有较好的应用价值。

关键词: 相当风速, 有功风功率密度, 山地风电场, 云南

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2019.02.013

Applicability Analysis of Two New Concepts for Wind Energy Assessment of Wind Farms in the Yunnan Mountainous Region

Jin Yan, Wang Xuefeng, Fan Lizhang
(Yunnan Climate Center, Kunming 650034)

Abstract: Using 10-minute wind speed data from two wind towers located at the Yangmei Mountain wind farms in Yunnan from 2011 to 2013, we calculated two new parameters for wind energy resource assessment: equivalent wind speed and available wind power density. These parameters were put forward by Yang Zhen-bin. The two new parameters were compared to the average wind speed and the average wind power density respectively. The results showed that the equivalent wind speed was smaller than the average wind speed. The wind speed frequency distribution was relatively concentrated and its energy index tended to the fact. The available wind power density was relatively smaller than the average wind power density used by a wind turbine. Our analysis showed that the two new parameters have application value in the Yunnan wind farm for wind energy resource assessments.

Keywords: equivalent wind speed, available wind power density, wind farm in mountainous region, Yunnan Province

0 引言

风能资源评估主要包括点评估和区域评估, 前者是指利用测风塔(站)观测数据, 采用数理统计方法对风能资源各项参数进行直接计算评估; 后者针对区域, 主要依赖大气数值模拟技术, 即基于大气动力学和热力学基本原理来描述近地层大气的运动过程以及地形、地貌对大气运动的影响^[1]。

随着风能资源开发利用的快速推进, 区域风能资源评估技术得到了迅速发展^[2-4], 风电场风能资源数值

模拟技术由一些商业软件提供技术支持^[5-6]。而在风电场工程的风能资源评估中, 基础参数的选择主要还是依据国家标准^[7], 其对风能资源的能量指标评判主要参数是实测风速和风功率密度。杨振斌等^[8]考虑到空气密度、风速频率分布是影响风能大小的两个重要因子, 提出了相当风速、有功风功率密度两个新参数, 旨在为准确进行风能资源评价提供更恰当的评价指标, 并进行了试验性分析。

由于云南风电场位于山地^[9], 风能资源分布极为复杂, 一些新技术和新方法在投入应用时, 相关工程技术人员进行了一些探索, 例如在风电场选址方法^[10]、针对区域风能资源模拟^[11]、对山地风电场风能资源模拟软件的验证^[12]等, 都做了一些工作。但对于基础参数, 相当风速和有功风功率密度两个新参数是

收稿日期: 2018年7月26日; 修回日期: 2019年1月7日
第一作者: 金燕(1978—), Email: apple_jjy25@163.com
通信作者: 王学锋(1962—), Email: wxf_yncc@126.com
资助信息: 中国气象局关键技术集成与应用项目
(CMAGJ2014M43)

否适用，需要进行探索和试验研究。因此，以云南山地风电场测风塔观测数据为基础，对两个新参数与实测风速和功率密度进行对比分析，以探索其在山地风电场中的适用性，为山地风电场资源评价提供更有意义的参考依据。

1 资料及方法

1.1 资料

本文选取位于云南东部典型山地、丘陵地带的杨梅山风电场两个观测年限较长、资料相对完整的测风塔风速观测资料作为基础研究数据，测风塔基本情况见表1。

表1 测风塔基本情况

Table 1 Basic information about the wind towers

测风塔	海拔/m	经度	纬度	观测时段
1#	2292	103°50'E	25°5'N	2010.09.01—2014.06.30
2#	2241	103°49'E	25°5'N	2010.08.08—2014.07.09

观测设备采用NRG系统，观测参数及取样情况见表2，由于风机轮毂高度距离地面均在60 m以上，本文选取65 m高度逐10 min平均风速作为风速的基础数据。

表2 研究数据基本情况

Table 2 Basic information about the research data

测风塔	风速		气温 观测层/m	气压 观测层/m	观测时间 间隔/min	取样时段
	观测层/m	取样层/m				
1#	65\55\40\25\10	65	10	7	10	2011.01.01
						2013.12.31
2#	65\55\40\25\10	65	10	7	10	2011.01.01
						2013.12.31

针对风速、气温和气压资料的完整性检验、关系检验及缺测数据的处理，根据文献[13]的数据检验和数据插补相关要求进行。

1.2 计算方法

根据杨振斌等^[8]提出的既兼顾空气密度又考虑风速频率分布的风能资源丰歉的直观判断参数相当风速和有功功率密度的计算公式，对2011年1月1日—2013年12月31日间的两个风速仪所记录的逐10 min平均风速，计算相当风速 \bar{V}_e 和有功功率密度 \bar{W}_e ，计算公式分别为：

$$\bar{V}_e = \left(\frac{\frac{1}{2n} \rho \sum_{i=1}^n V_i^3}{0.955 \times 1.225} \right)^{\frac{1}{3}}, \quad (1)$$

式中， $V_i(i=1, \dots, n)$ 为实测风速，就本文而言，即风速仪所记录的逐10 min平均风速。

$$\bar{W}_e = \int_{v_1}^{v_2} \frac{1}{2} \rho v^3 p(v) dv, \quad (2)$$

式中， v_1 为启动风速； v_2 为切出风速； $p(v)$ 为风速概率分布密度函数，不同型号风机都具有各自的“启动风速”，“切出风速”（切出风速指风力发电机组并网发电的最大风速，超过此风速机组将切出电网，就是风机会停机，停止发电），只有处于这两个风速区间的能量才能被风机部分地转换为电能，所以常常将“启动风速”和“切出风速”之间的风速称为“有效风速”。为不失一般性，本文“启动风速”和“切出风速”分别取3.5和25.4 m/s。

两个公式计算中所涉及的平均空气密度 $\bar{\rho}$ 通过公式 $\rho = \frac{P}{RT}$ 推算。

2 平均风速与相当风速的对比分析

2.1 风速年变化

图1给出了1#和2#测风塔65 m高度实测风速 V_{re} 与相当风速 V_e 年变化，从逐日的实测风速 V_{re} 与相当风速 V_e 来看，两个序列的相关系数均在0.999以上，通过了0.01的显著性检验。由图可知，两个测风塔65 m高度风速和相当风速在一年中的变化趋势一致，1—5月较大，7—9月较小，均呈现出明显的冬春季大、夏秋季小的全年两季风特征，这与云南其他山地风电场风速年变化特征一致。

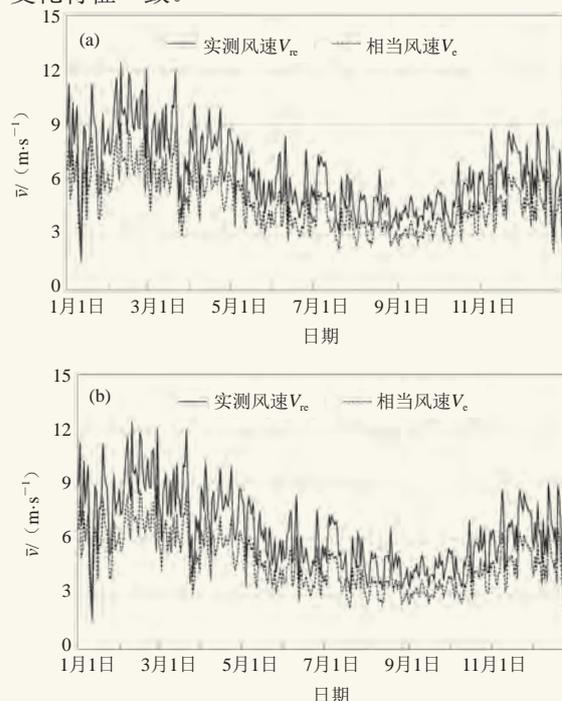


图1 1#测风塔 (a) 和2#测风塔 (b) 实测风速 V_{re} 与相当风速 V_e 年变化
Fig. 1 The annual change of V_{re} and V_e about tower No.1 (a) and No. 2 (b)

进一步分析两个观测点年均逐日实测风速与相当风速之间的差值变化。从图2可知两者之间的差值在年内呈现冬春季偏大，夏秋季偏小的特征，与风速的年变化规律一致。

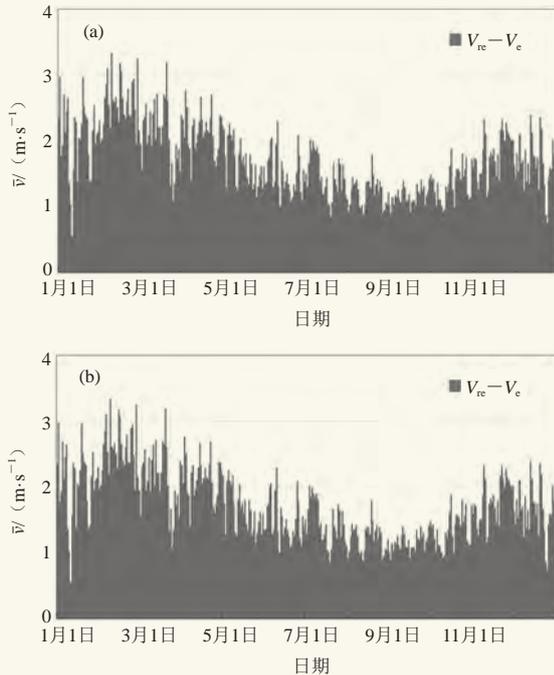


图2 1#测风塔 (a) 和2#测风塔 (b) 实测风速 V_{re} 与相当风速 V_e 差值年变化
Fig.2 Annual changes in the differences in V_{re} and V_e from towers No. 1 (a) and No. 2 (b)

云南山地风场的海拔一般均在2000 m以上，年平均气温不高于12 °C，根据平均空气密度公式推算得出两个测风塔空气密度大致在0.90附近，由此分析也可以印证相当风速小于实测风速。

从表3可以看出，1#和2#测风塔在观测时段内年平均实测风速 V_{re} 与相当风速 V_e 差值分别为1.7和1.9 $m \cdot s^{-1}$ ，两个变量间的差值季节性变化较为一致，即在夏秋季差值较小，一般小于2.0 $m \cdot s^{-1}$ ，在冬春季差值偏大，一般大于2.0 $m \cdot s^{-1}$ 。

表3 1#测风塔和2#测风塔实测风速 V_{re} 与相当风速 V_e 差值季节变化 (单位: $m \cdot s^{-1}$)
Table 3 Seasonal variation in the differences between V_{re} and V_e for towers No. 1 (a) and No. 2 (b) (unit: $m \cdot s^{-1}$)

测风塔	春季 (3—5月)	夏季 (6—8月)	秋季 (9—11月)	冬季 (12月一次年2月)
1#测风塔	2.0	1.4	1.4	2.1
2#测风塔	2.2	1.6	1.7	2.1

由于相当风速是从能量的角度出发来阐述风速对风能大小影响的一个量纲的参量，在某种意义上已

经摒弃了不做功的小风速和大风速，在年变化上相对平稳。平均风速在大风季偏大，小风季偏小，所以导致两者的差值在年变化中呈现与平均风速相同的变化趋势。

同时，考虑到相当风速是将某一平均风速系列，折算到标准大气下，服从瑞利分布的且具有相同能量的量纲参量，这样就使得在不同下垫面、不同海拔条件下风电场风能资源的比较成为了可能，这才是在风能资源评估中运用相当风速概念的真正价值所在。

2.2 风速频率

图3为两个观测点平均风速 V_{re} 与相当风速 V_e 的风速频率分布。由图可见实测风速较相当风速更趋向于正态分布，相当风速的风频在小风速段所占比例较高，同时大风速段所占比例减小。结合相当风速推导公式来看，相当风速是折算为标准大气压下的实际用来做功的那部分风速，同时还考虑了空气密度这一物理量。由于山地风电场多数建在山地高处，空气受到地形的抬升与挤压作用，在山脊处的风速明显高于山脚处，同时考虑空气密度随海拔的直减率，在山地高海拔地区空气密度明显低于平原。如果仅用实测风速

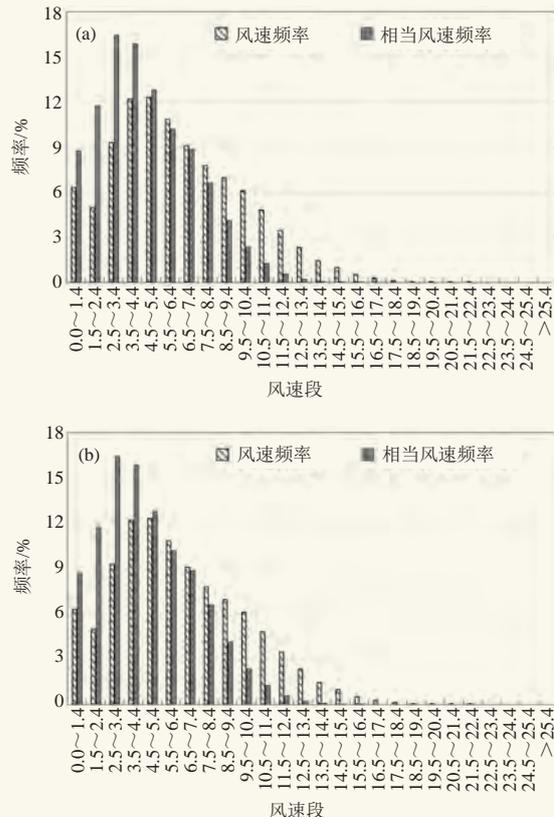


图3 1#测风塔 (a) 和2#测风塔 (b) 实测风速 V_{re} 与相当风速 V_e 风速频率分布
Fig. 3 The wind speed frequency distribution of V_{re} and V_e from towers No. 1 (a) and No. 2 (b)

来衡量做功的大小，则与实际做功之间势必会存在较大偏差，而选用相当风速来代替实测风速对山地风电场进行资源评估，则能避免这一偏差的出现，能量指标更趋于实际，也更直观。这也从侧面印证了相当风速与平均风速的差值存在大风季大，小风季小的变化特征。

3 平均风功率密度与有功风功率密度对比

图4为两个观测点平均风功率密度与有功风功率密度的年均逐日分布图，从逐日的平均风功率密度 W 与有功风功率密度 W_e 来看，两个序列的相关系数均在0.999以上，通过了0.01的显著性检验。由图可知平均风功率密度与有功风功率密度全年的变化规律较为一致，即12月一次年4月风功率密度偏大，6—10月风功率密度偏小。

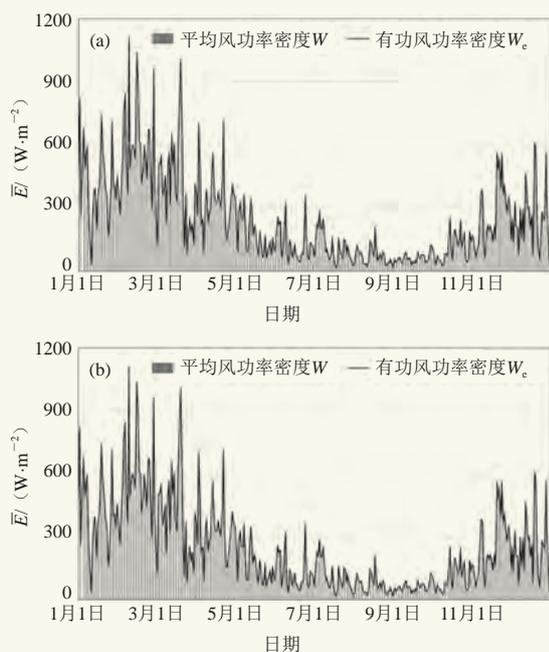


图4 1#测风塔 (a) 和2#测风塔 (b) 平均风功率密度 W 与有功风功率密度 W_e 年变化
Fig. 4 Annual changes in W and W_e from towers No. 1 (a) and No. 2 (b)

从两者的差值变化来看（图5），两个观测点的有功风功率密度较平均风功率密度偏小，全年中，冬春季两者的差值偏小，夏秋季差值偏大，与风速差值的年变化规律刚好相反。从公式来看，平均风功率密度为平均风速在整个统计时段内所做的贡献，而有功风功率密度是有效风速在整个统计时段内所做的贡献，所以有功风功率密度较平均风功率密度偏小。从两者的差值来看，由于云南在冬春季风速偏大，风机处于有效风力范围内对平均风能密度的直接贡献就

大，所以两者的差值偏小；而在夏秋季风速普遍偏小，风机处于有效风力范围内对平均风能密度的直接贡献就小，所以两者的差值偏大。

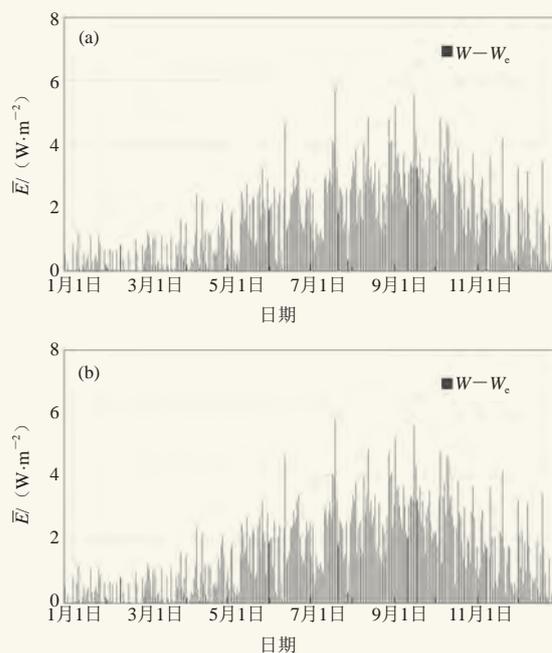


图5 1#测风塔 (a) 和2#测风塔 (b) 平均风功率密度 W 与有功风功率密度 W_e 差值年变化
Fig. 5 Annual change in the difference of W and W_e from tower No. 1 (a) and No. 2 (b)

从表4可以看出，1#和2#测风塔在观测时段内年平均风功率密度 W 与有功风功率密度 W_e 分别为1.6和1.2 $W \cdot m^{-2}$ ，两个变量间的差值季节性变化较为一致，即在夏秋季差值偏大，一般在2.0~3.0 $W \cdot m^{-2}$ ，在冬春季差值偏小，一般小于1.0 $W \cdot m^{-2}$ 。

表4 1#测风塔和2#测风塔实平均风功率密度 W 与有功风功率密度 W_e 差值季节变化（单位： $W \cdot m^{-2}$ ）
Table 4 The seasonal variation in the difference of W and W_e for towers No. 1 (a) and No. 2 (b)

测风塔	春季 (3—5月)	夏季 (6—8月)	秋季 (9—11月)	冬季 (12月—次年2月)
1#测风塔	1.0	2.3	2.4	0.6
2#测风塔	0.8	1.8	1.6	0.6

4 结论

1) 风速和相当风速的年内变化一致，即冬春季大，夏秋季小；相当风速较实测风速偏小，两者之间的差值在年内变化与风速变化规律也基本一致，即在夏秋季差值较小，一般小于2.0 $m \cdot s^{-1}$ ，在冬春季差值偏大，一般大于2.0 $m \cdot s^{-1}$ 。

2) 从风速频率分布来看，相当风速分布更为集中，摒弃了实测风速对风能不实际做功的部分，让能

量指标更趋于实际,也更客观准确。

3) 平均风功率密度与有功风功率密度的年内变化一致,即冬春季大,夏秋季小;有功风功率密度较平均风功率密度偏小,两者之间的差值在全年中呈现冬春季偏小,夏秋季偏大的特征,即夏秋季差值一般在 $2.0\sim 3.0\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,冬春季差值一般小于 $1.0\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$,这主要由于云南在冬春季风速偏大,风机处于有效风力范围内对平均风能密度的直接贡献就大,所以两者的差值偏小;而在夏秋季风速普遍偏小,风机处于有效风力范围内对平均风能密度的直接贡献就小,所以两者的差值偏大。

4) 综合分析表明,对于云南山地风电场而言,相当风速和有功风功率密度对于风能资源的表征较实测风速和风功率密度更接近资源的实际,使得在不同下垫面、不同海拔条件下风电场的风能资源的简单比较成为了可能,作为一种资源评价指标加以应用是有实际意义的。

参考文献

- [1] 宋丽莉,周荣卫,杨振斌,等.风能资源开发利用的气象技术应用和发展.中国科学,2012,14(9):96-101.
- [2] 杨振斌,薛析,桑建国.复杂地形风能资源评估研究初探.太阳能学报,2004,25(6):744-749.
- [3] 李泽椿,朱蓉,何晓凤.风能资源评估技术方法研究.气象学报,2007,65(5):708-717.
- [4] 龚强,袁国恩,张云秋,等.MM5模式在风能资源普查中的应用试验.资源科学,2006,28(1):145-150.
- [5] 冯长青,杜燕军,包紫光,等.风能资源评估软件WAsP和WT的适用性.中国电力,2010,43(1):61-65.
- [6] 韩春福,南明君.基于WAsP的风电场风能资源评估的应用及分析.能源工程,2009(4):26-30.
- [7] 施鹏飞,朱瑞兆,姜慧英,等.风电场风能资源评估方法,GB/T 18710-2001.北京:中国气象出版社.
- [8] 杨振斌,朱瑞兆,薛析.风电场风能资源评价两个新参数.太阳能学报,2007,28(3):248-251.
- [9] 朱勇,王学锋,范立张,等.云南风能资源及其开发利用.北京:气象出版社,2013.
- [10] 洪祖兰.云南山区风电场选址的方法问题.云南水力发电,2007,23(3):8-12.
- [11] 杨晓鹏,杨鹏武.基于数值模拟的云南风能资源分布研究.云南大学学报:自然科学版,2012,34(6):684-688.
- [12] 王学锋,杨鹏武,朱勇.基于WAsP模拟云南复杂地形风电场的风能资源.云南气象,2014,34(2):64-67.
- [13] 王学锋,范立张,朱勇,等.风电场风能资源测量数据处理及评估技术规范:DB53/T470-2013.昆明:云南省质量技术监督局,2013.

中关村高企协气象科技专业委员会正式运行

■ 岳婷

2019年4月9日,中关村高新技术企业协会气象科技专业委员会第一次全体委员大会暨2019第一季度工作会在北京召开。中国气象局原副局长许小峰,全国政协委员、科学传播专家朱定真,海淀区投促局副局长杜嘉宁,中关村高新技术企业协会常务副会长兼秘书长曹毅,中关村高新技术企业协会联合党委书记吴春明,以及专委会技术委员会委员、专委会全体成员代表等社会各界领导及嘉宾近50人出席会议。

在会议主题报告阶段,许小峰研究员围绕气象事业的需求与目标、进步与差距、机遇与空间展开演讲,从我国气象事业自身发展进步、与国际水平的比较两个维度,分析了我国气象事业发展的成就、差距和进一步发展的空间以及给企业发展带来的机遇。他指出,中国目前已成为世界气象中心,初步具备全球监测、全球预报、全球服务的业务能力,气象服务已逐渐融入经济社会各个领域,潜在机遇将越来越多、越来越广泛。专委会技术委员会主任朱定真就转型过程中气象经济面临的问题与对策进行深入剖析。朱定真委员指出,我国现阶段的气象事业发展较快,但气象产业发展还处于起步阶段,与发达国家相比差距较大,这一产业的潜在市场规模巨大,仍需所



图 许小峰研究员做主题报告

有气象人共同奋进,推动气象产业创新发展。

会议最后,由主任单位富景天策总经理张勇主持审议通过了气象专委会管理办法和专委会2019年工作计划。气象专委会将与《气象科技进展》深度合作,通过开辟专栏和专刊的方式,为社会化的气象科技企业提供一个交流的园地和窗口。

(作者单位:富景天策科技集团)