DOI:10.19789/j.1004-9398.2026.01.006　　**Open Access**
文献引用:扶翼武,何飞龙,许谦,等.基于平均风剖面指数的大口径射电望远镜台址风场特性研究[J].首都师范大学学报(自然科学版),2026,47(1):44-55. FU Y W,HE F L,XU Q,et al. Study on wind field characteristics of large aperture radio telescope site based on average wind profile index[J]. Journal of Capital Normal University(Natural Science Edition),2026,47(1):44-55.

基于平均风剖面指数的大口径射电望远镜台址风场特性研究*

扶翼武[1,2]，何飞龙[2]，许 谦[2,3,4**]，潘元月[1**]，李来兵[2]，张世交[2,5]

(1. 湘潭大学物理与光电工程学院“恒星与星际物质”省高校重点实验室，湖南 湘潭　411105；2. 中国科学院新疆天文台，新疆 乌鲁木齐　830011；3. 射电天文与技术全国重点实验室，北京　100101；4. 新疆射电天体物理重点实验室，新疆 乌鲁木齐　830011；5. 中国科学院大学，北京　100049)

摘要:风载荷是影响射电望远镜观测性能的重要因素之一,准确获取台址风场特性对风扰下望远镜观测性能的提升至关重要。平均风剖面指数(α)表征了平均风速随垂直高度的变化规律,是台址风场特性表征的重要参数之一。研究面向新疆奇台110 m口径全向可动射电望远镜(QTT)台址风场,利用台址梯度风塔数据,对比了4种α计算方法,最终采用对数替换的方法精细计算各样本区间的α,得到了QTT台址16个标准风向下的α参考值。与规范中B类地面粗糙度α值0.15比较,在[0,2.00)、[2.00,4.00)和[4.00,6.00) m/s风速,精细计算得到的参考值精度分别提升了26.65%、15.76%和11.58%。基于α对台址风场特性分析表明,α随风速的变化与台址地形、来风频率之间存在较强的相关性。

关键词:大射电望远镜;新疆奇台QTT望远镜台址;平均风剖面指数;数据分析
中图分类号:P112　　**文献标志码**:A

Study on wind field characteristics of large aperture radio telescope site based on average wind profile index*

FU Yiwu[1,2]，HE Feilong[2]，XU Qian[2,3,4**]，PAN Yuanyue[1**]，LI Laibing[2]，ZHANG Shijiao[2,5]

(1. Provincial Key Laboratory of “Stars and Interstellar Matter”，School of Physics and Optoelectronic Engineering，Xiangtan University，Xiangtan Hunan　411105；2. Xinjiang Astronomical Observatory，Chinese Academy of Sciences，Urumqi Xinjiang　830011；3. State Key Laboratory of Radio Astronomy and Technology，Beijing　100101；4. Xinjiang Key Laboratory of Radio Astrophysics，Urumqi Xinjiang　830011；5. University of Chinese Academy of Sciences，Beijing　100049)

Abstract:Wind load is an important factor that affects the observation performance of radio telescopes.

收稿日期:2025-04-25
* 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2022D01E085);新疆维吾尔自治区天山英才培养计划项目(2023TSYCCX0105);西部之光-西部交叉团队重点实验室专项项目(xbzg-zdsys-202320);中国科学院科研仪器设备研制项目(PTYQ2022YZZD01);新疆维吾尔自治区重大科技专项项目(2022A03013-3)
** 通信作者:xuqian@xao.ac.cn;panyy@xtu.edu.cn

Along with the increase of the telescope aperture, the wind load acting on the observed performance of the telescope appears more obviously. Therefore, it is important for obtaining the wind field characteristics accurately, which would improve the observation performance of the telescope under the wind disturbance. The average wind profile index (α) shows the varying relation between the average wind speed and the vertical height, which is one of the important parameters of the wind field character at a telescope site. This work focuses on the wind field of 110 m aperture Qitai radio telescope (QTT), located in Xinjiang. With the gradient wind tower data of the QTT site, we use the logarithmic replacement way to compute the value of α for the selected data after comparing four calculation methods. The values of α are deduced in condition of 16 standard wind directions. Compared with the standard value of α of class B of the ground roughness (α=0.15), the reference values in our exact evaluation are improved to be 26.65%, 15.76 % and 11.58% in the range of the wind speed of [0, 2.00), [2.00, 4.00) and [4.00, 6.00) m/s, respectively. Based on the analysis of the wind field characteristics of the QTT site, we suggest that the value of α changing with the wind speed is strongly related to the topography of the telescope site and the frequency of incoming wind.

Keywords: large radio telescope; the site of the QTT telescope in Xinjiang; average wind profile index; data analysis

CLC: P112 **DC**: A

0 引 言

在射电天文领域,大口径射电望远镜可以显著提升观测的灵敏度和分辨率。目前,世界上100 m级口径的全可动射电望远镜分别为美国的Green Bank Telescope(GBT)[1]和德国Effelsberg[2]。近年来,由中国科学院新疆天文台主导的奇台110 m口径射电望远镜(Qitai radio telescope, QTT)项目正在建设中。QTT可工作频段为150 MHz~115 GHz,最高指向精度2.5″[3]。建成后,QTT将在纳赫兹引力波、黑洞、暗物质、快速射电暴以及生命起源等前沿基础学科领域发挥重要作用,在大样本脉冲星高密度监测领域具有广泛意义。包括:对毫秒脉冲星的观测以研究其内部结构和自转噪声起源;偏振和总功率观测研究脉冲星辐射机制和星际磁场;星际闪烁观测以开展星际介质研究,为我国未来更遥远的空间探测活动提供强大的技术支撑。2022年12月Nature官网遴选并发布了2023年全球最值得关注的重要科学事件,QTT项目位列其中[4]。

射电望远镜天线在野外露天环境下工作,其高频段观测性能易受风扰影响。随着天线口径增大,结构刚度保障愈发困难,同时受风面积的增加,天线更易发生风致结构变形,进而降低望远镜的指向精度,台址风限制了射电望远镜在高频段的有效观测时长。GBT实测统计指出[5]:风速<2.50 m/s时,望远镜最高指向精度可达1.5″;风速>3.00 m/s时,40 GHz以上频段的观测将受到影响;风速>5.00 m/s时会影响20 GHz以上频段的观测;当风速持续超过11.00 m/s时,所有观测停止。为提高望远镜的观测性能,进行有针对性的抗风扰设计,台址风场特性研究必不可少。Smith等[6]研究了Nobeyama 45 m射电望远镜天线在风中的动态特性,测量了指向误差随风速变化的关系,特别关注了不同风频率对天线振动的影响;Buffa等[7]通过搭建风、雨、大气压等气象要素监测系统对撒丁岛射电望远镜(Sardinia radio telescope, SRT)台址气象环境进行观测,表明风扰对望远镜指向精度的影响较大,应加强风要素的监测;He等[8]利用单点风塔实测数据评估数值模拟误差,基于评估后的数值模拟结果及单点风塔实测数据,获取了台址全域风场特性,为天线抗风扰设计提供了依据。

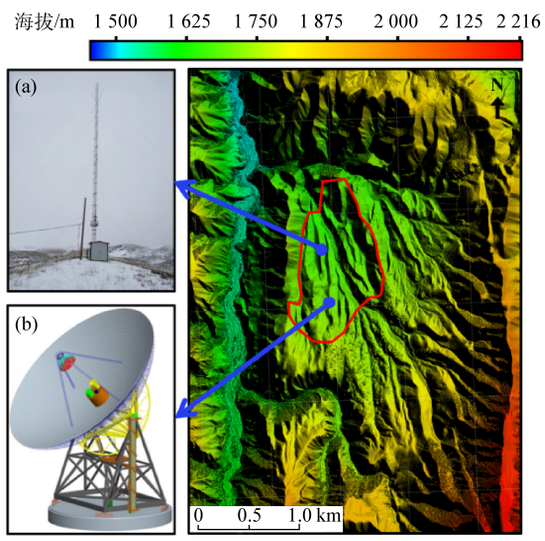
平均风速剖面是描述平均风速随离地高度变化的曲线,反映了天线不同高度承受风载的情况。天线在不同大小的风载作用下导致的面形精度和指向精度降低程度也各不相同,一定程度上决定了天线可观测的频段。对于天线结构抗风扰设计、伺服抗风扰控制、台址风环境优化等抗风扰工作而言,均是以准确重构平均风速剖面为前提,而平均风速剖面指数(α)是重构平均风速剖面的关键参数。因此,准确获取台址α对望远镜观测性能保障

工作至关重要。平均风速剖面的相关研究起始于1916年Hellman的风相关方程[9],在此基础上,Davenport[10]基于大量观测数据提出了指数律模型,在各类风速及大气层结状态下均表现出优异的实测吻合度[11],被多个国家规范采用[12],广泛应用于气象观测、台风预测以及风电工程等领域;金莉莉等[13]分析了乌鲁木齐近地层α随风速的变化规律,表明α在风速<1.00 m/s时变化显著,风速>2.00 m/s时变化较小,α整体随风速增加呈对数式下降;Bolbasova等[14]研究了大型真空太阳望远镜(large solar vacuum telescope,LSVT)台址的平均风速剖面分布,指出风速呈现冬季强夏季弱的季节性变化,为观测台站自适应光学设计提供了依据;Wang等[15]基于台风观测数据,研究了平均风速剖面随风速变化的海陆差异,推动了台风条件下近地面平均风速剖面的理论和应用研究;梅亮[16]通过指数律模型对不同站点的α进行详细计算,显示α值夏秋季较大,冬春季较小,且层高>50 m的α值均高于50 m以下的α,实测值与参考值误差幅度为15%~137%,该结论证明了在评估山地地区风资源时,通过实测数据精细计算α的重要性。上述研究表明,针对α进行精细计算在不同领域风工程设计中具有现实的工程价值。因此,为了提升射电望远镜的观测性能,开展台址α的精细计算与分析十分必要。

本研究应用指数律模型对风参数进行替换,得到4种α的计算方法,结合实测数据对QTT台址风场特性展开分析。利用QTT台址梯度风塔数据,采用4种不同α计算方法并通过误差分析得到了一种适用所选数据的α计算方法。对计算结果进行分布统计得到了台址16个风向下的α参考值,再利用分布统计中的风参数对台址风场特性展开分析,得到α随风速的变化规律。研究成果为QTT台址的α计算提供了更准确的方法,为工程抗风设计建立了可靠的风场数据支撑。

1　QTT台址介绍及风数据处理

新疆地处欧亚大陆腹地,中国的西北地区,拥有“三山夹两盆”的特殊地形,高山与盆地相间的独特地理环境使得新疆境内多峡谷、河谷和隘道等地形,区域风场整体受西风环流和独特地形影响较大[17]。QTT台址位于新疆奇台县半截沟镇石河子村,地理位置为43°36'4.03"N,89°40'56.99"E,地处东天山北麓,准噶尔盆地东南缘,是一处东西约1.5 km、南北约2.0 km的矩形盆地,四周海拔为1 860~2 250 m。台址远离大风区域,其上空气流主要受奇台县整体地形的影响,冬半年盛行偏东风,夏半年盛行偏西风[18]。图1展示了QTT台址的区域位置和海拔高度[19]。风塔高60 m,相对地面每隔5 m设一个层高,共12层,每个层高均布设有一套Windsonic型2D超声波风速风向传感器。采集设备为CR3000微型数据采集器,采集频率为6次/min,每次间隔10 s[20],每次采集的数据类型有“平均风速”“极大风速及对应风向”和“采样风速及对应风向”。



注:插图为奇台110 m口径射电望远镜及附近地形的海拔示意;红色线框区域为QTT台址。

图1　奇台射电望远镜(QTT)台址位置
(a)梯度风塔;(b)QTT天线

Figure 1　the location of the Qitai radio telescope(QTT) radio telescope site
(a)gradient wind tower;(b)QTT antenna

选取QTT台址梯度风塔2021年完整年实测风数据,以风塔15、25、35、45 m层高处的平均风速和55 m层高处的极大风速及对应风向为研究对象,共525 600组数据。在数据品质的检验与把控过程中,显示了3类异常风速数据:(1)出现“非数字(not a number,NAN)”“1 000”和“999”的常见坏点数据;(2)高于临近风速5倍的明显突变数据;(3)连续性缺失数据。以上异常可能是由于季节轮换的温差过大导致风传感器无法正常工作引起的[21-22]。研究显示异常数据占全年的1.932 8%,其中常见坏点占1.449 4%,缺失数据占0.487 3%,明显突变数据占

0.003 1%。坏点和缺失大多连续性出现,无法根据上下风数据进行差值恢复,采取删除处理。明显突变数据百分比很小,且零散出现,采取插值修正处理。经过数据的删除和修正后,有效数据量为515 464组,完整率高达98%,确保了后续分析的可靠性。

2　α算法优选

2.1　计算方法

近地层平均风速的空间分布受局部地形、地表粗糙度及大气稳定度等因素影响,表现出显著的垂直梯度变化特征[23]。为定量研究台址风速随高度的变化规律,采用指数律模型计算α[8-10],其表达式为

$$\frac{v_i}{v_0}=\left(\frac{z_i}{z_0}\right)^{\alpha},\tag{1}$$

式中:z_0为参考高度;z_i为其他高度;v_0为z_0处平均风速大小;v_i为z_i处平均风速大小。本工作中z_0=15 m,z_i分别取25、35和45 m。

基于指数律公式的不同变量替换建立函数关系,采用最小二乘法拟合获得风剖面指数。计算数据选取55 m层高极大风速在[4.00,6.00) m/s对应的各层高平均风速,每层高有效数据为37 662组。

基于指数律模型构建4种函数关系的计算方法。

(1)对应指数函数关系。对式(1)中的高度比和风速比进行替换,令$x_i=z_i/z_0$,$y_i=v_i/v_0$,得到关系式[15]

$$y=x_i^{\alpha}。\tag{2}$$

(2)对应比例系数-指数函数关系。对式(1)中的高度和风速进行替换,令$x_i=z_i$,$y_i=v_i$,$A=v_0\left(1/z_0\right)^{\alpha}$,通过替换得到[24]

$$y_i=Ax_i^{\alpha}。\tag{3}$$

(3)对应线性函数关系。对式(1)两边同时取对数并进行替换,令$x_i=\log_{10}\left(z_i/z_0\right)$,$y_i=\log_{10}\left(v_i/v_0\right)$,得到线性函数关系式[25-27]

$$y_i=\alpha x_i。\tag{4}$$

(4)对应截距-线性函数关系。对式(1)两边同时取对数,通过对数拆分得到等式

$$\log_{10}\left(v_i/v_0\right)=\alpha\log_{10}\left(z_0\right)+\alpha\log_{10}\left(1/z_0\right),\tag{5}$$

对式(5)中取对数后的高度和风速比进行替换,令$x_i=\log_{10}\left(z_0\right)$,$y_i=\log_{10}\left(v_i/v_0\right)$,$b=\alpha\log_{10}\left(1/z_0\right)$,得到函数关系式[28]

$$y_i=\alpha x_i+b。\tag{6}$$

拟合方法是基于最小二乘指标,通过算法迭代找到预测值与给定实测值之间的最小误差平方和(sum of squared errors,SSE),可将SSE写成误差函数形式

$$S(\alpha)=\sum_i^m\left(F\left(\alpha,x_i\right)-y_i\right)^2,\tag{7}$$

式中:m为数据组数,$F\left(\alpha,x_i\right)$为风剖面指数的函数关系式。迭代采用Levenberg-Marquardt算法,其公式为

$$\alpha_{k+1}=\alpha_k-\left(\boldsymbol{J}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{J}_k-\lambda\boldsymbol{I}\right)^{-1}\boldsymbol{J}_k^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_k,\ \ \boldsymbol{r}_k=y_i-F\left(\alpha_k,x_i\right),\tag{8}$$

式中:k为迭代次数;$\boldsymbol{J}_k$为$S(\alpha)$关于α的雅可比矩阵,表示模型对参数的敏感性;λ为阻尼因子,用于控制算法的收敛性;$\boldsymbol{I}$为单位矩阵,$\boldsymbol{r}_k$为残差向量,表示预测值与实测值之间的误差。

结合式(2~4、6和7),将层高及对应的平均风速分别带入函数关系中得到实测数据点x_i和y_i,代入式(8)得到α。

2.2　算法优选

均方根误差(root-mean-square error,RMSE)是用来衡量预测值与实测值之间的绝对差异,其值越小说明这种方法的计算精度越高,计算公式为

$$E_{\mathrm{RMS}}=\sqrt{\frac{1}{n}\sum_{t=1}^{n}(V_t-V_t')^2},\tag{9}$$

式中:E_{RMS}为RMSE值;n为数据组数;t为第t组数据;V_t和V_t'分别表示第t组的实测风速和反演风速。

将4种方法计算得到的α分别带入指数律公式,以参考高度及对应风速为基准,推算出不同层高的平均风速,即反演风速。通过式(9)计算反演风速与实测风速之间的RMSE,利用误差分析判断计算方法的准确度。

37 662组风场数据计算结果如图2所示。左斜线、右斜线和横线方柱分别表示z_i~z_0不同层高之间的反演风速误差,用25~15、35~15和45~15表示。竖线方柱表示每组数据反演风速误差的平均值,用Avg表示。研究表明,方法(3)的整体误差最小,实测吻合度最优,方法(2)的误差最大,实测吻合度最差。方法(1、3、4)的RMSE随高度的增加而减小,可能与近地面风速受粗糙度影响有关,随着高度增加,地面摩擦作用减弱,风速变化趋于稳定,反演误差相应降低[29]。对计算误差来源进行分析:首先α的计算离不开层高的选取,层高选取的越密集越能

描述更真实的风速,误差就会越小,受限于观测成本和观测环境不可能得到所有层高的实测风速,这种误差是无法避免的;其次计算方法本身的数学推导并不存在误差;最后误差可能还来源于对α拟合计算时,拟合过程本身就存在拟合误差。

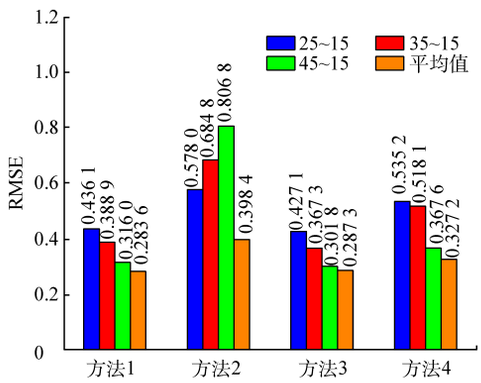


图2　实测风速与反演风速均方根误差(RMSE)值对比

Figure 2　comparison of the root mean square error (RMSE) values between the measured wind speed and the inverted wind speed

3　台址风场特性研究

3.1　风速风向统计及划分

应用台址60 m梯度风塔2021年全年515 464组有效风数据,统计55 m层高每月平均风速和极端风速显示:(1)台址月平均风速随季节变化明显,夏秋季月平均风速普遍高于春冬季;(2)5月平均风速最大为2.77 m/s,1月平均风速最小为0.99 m/s;(3)>17.00 m/s的极端风速百分比极少,仅59条风数据,大多集中出现在同一天,主要分布在6和8月。因此,夏季对望远镜观测性能的影响普遍高于其他季节。通过对55 m层高极大风速及对应风向统计及划分,研究表明,[0,2.00)、[2.00,4.00)、[4.00,6.00)、[6.00,8.00)和[8.00,10.00) m/s风速百分比分别为65.98%、22.48%、7.35%、2.10%和1.06%,风速主要集中在[0,4.00) m/s,≥10.00 m/s风速仅为1.03%,故后续分析主要针对[0,10.00) m/s的风数据。按[0,10.00) m/s的5个风速区间划分数据,得到5个风数据样本集。

依据GB/T 35227—2017《地面气象观测规范风向和风速》中的16标准风向对来风方向进行划分,16标准风向的风向方位、符号及相应角度数如图3所示,图中将360.0°均分成16份,每份扇形区域对应22.5°,即对应一个风向,每个风向采用英文大写字母缩写表示,并标明了每个风向的中心角度数。将5个风数据样本进一步按风向划分得到80个样本集,划分结果见表1。研究表明,台址[0,2.00) m/s风速主要集中于南东南(south-southeast,SSE)风向及邻近风向;[8.00,10.00) m/s风速则多出现在南西南(south-southwest,SSW)风向,其中东北(northeast,NE)、东东北(east-northeast,ENE)、东(east,E)、东东南(east-southeast,ESE)和西西北(west-northwest,WNW)风向分布频次均<10;主流风向为北(north,N)风向和南(south,S)风向,SSE风向风频最高,西(west,W)风向风频最低。

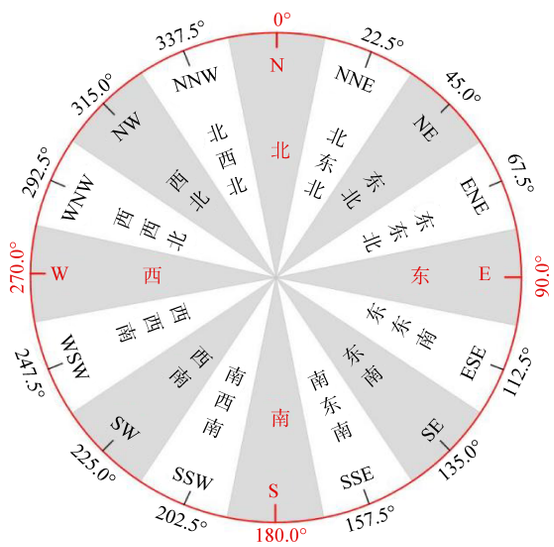


图3　16标准风向方位

Figure 3　the azimuth map of 16 standard wind directions

3.2　α分布统计

应用表1数据,采用方法3计算对应的α值,对计算结果进行分布统计如图4所示。图中水平方向对应5个风速段,竖直方向对应16个风向,各子图给出了α的分布频率和正态分布曲线,曲线上方分别给出了该风向下α的有效计算量、正态分布峰值α_{μ}(均值)和众数α_{m}(最高频率区间中值)。分布统计中偏度和峰度分别反映了分布的不对称性和尖锐程度,正态分布的偏度和峰度分别为0和3。偏度>0表示分布右偏,<0表示分布左偏;峰度>3表示数据离散程度低,<3表示数据离散程度高。α分布统计中,不同风速风向下的α分布偏度和峰度会存在差异[30]。

结合图4分析得出以下结论:(1)不同风速下的α分布。[0,2.00) m/s的α分布偏度集中于0~0.5,峰度均<3,表明分布高度对称且离散程度高,呈扁平

表1 80个风数据样本集数目统计

Table 1 statistics of the number of 80 wind data sample sets

风向	样本数	风速/(m·s^{-1})				
		[0,2.00)	[2.00,4.00)	[4.00,6.00)	[6.00,8.00)	[8.00,10.00)
N	44 658	17 928	17 399	7 813	1 296	156
NNE	31 568	15 341	11 259	4 484	461	16
NE	30 118	17 320	9 332	3 253	203	8
ENE	23 015	15 958	5 786	1 221	46	1
E	24 405	20 643	3 263	459	30	7
ESE	28 598	26 754	1 546	238	50	9
SE	50 983	48 155	2 648	109	31	15
SSE	54 019	46 885	6 731	303	59	23
S	51 604	37 028	9 376	2 598	1 290	691
SSW	49 075	23 380	8 323	5 366	4 556	3 641
SW	27 853	18 200	6 360	1 848	775	343
WSW	11 385	9 103	1 720	355	106	57
W	8 108	7 072	858	123	35	14
WNW	8 280	7 034	1 066	143	24	5
NW	26 091	13 834	9 399	2 094	461	165
NNW	45 704	16 440	20 178	7 255	1 354	276

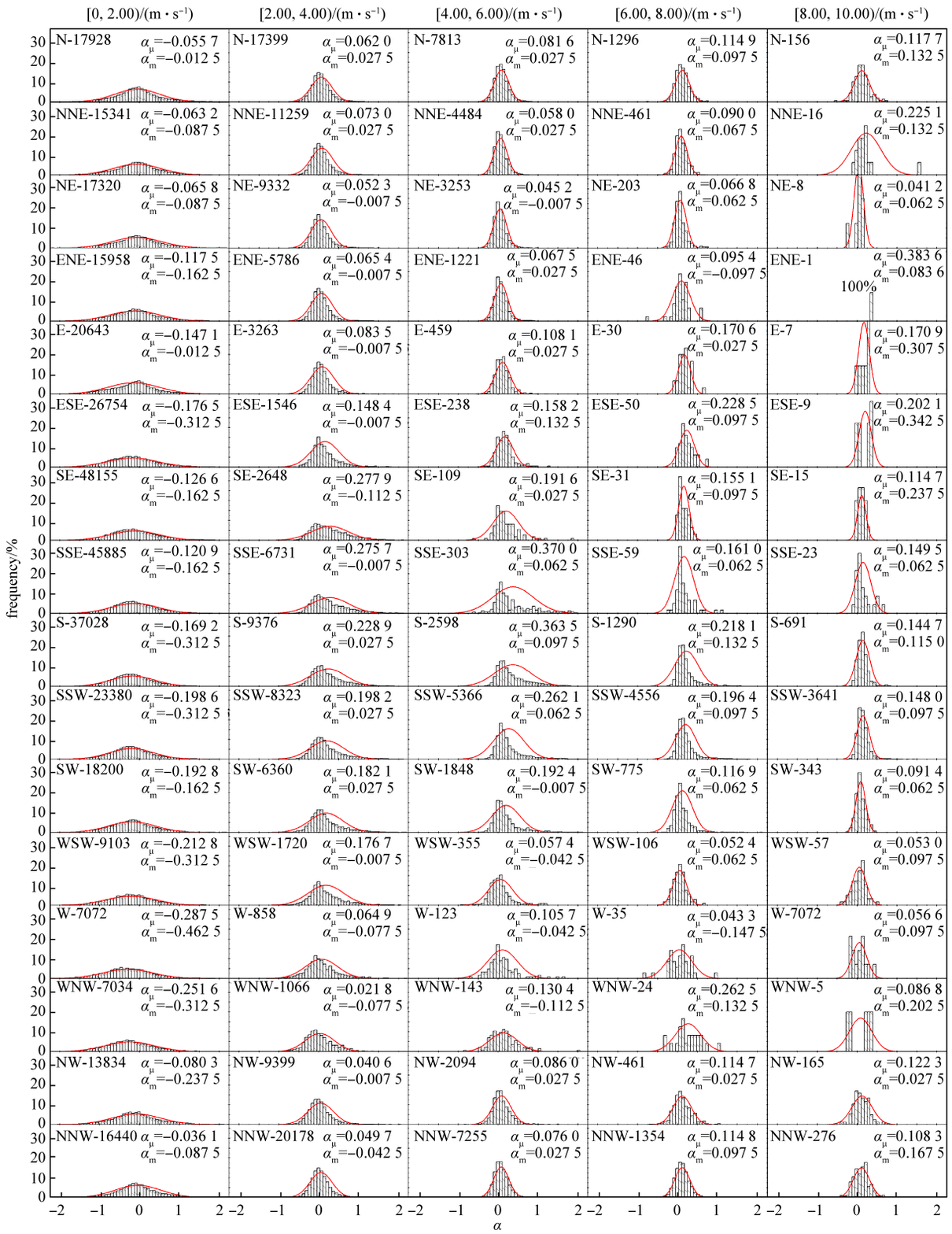
状,各风向下α分布差异不显著;[2.00,4.00) m/s偏度均>1,峰度均>3,分布呈现尖峰厚尾特征,N和S风向α分布开始分化,N风向α分布离散度降低,S风向α分布右尾延伸,导致α_μ受极端值影响被拉高;[4.00,6.00) m/s偏度和峰度进一步增大,N和S风向α分布差异加剧,S风向α分布更集中,呈尖峰薄尾分布,S风向α分布右偏更显著,α_μ因右偏被极端值主导,α_m更具代表性;[6.00,10.00) m/s的α有效数据量较少,导致分布偏度和峰度跨度较大,分布形状各异,极值对分布形态干扰显著,α_μ和α_m的代表性均减弱。(2)不同风向下的α分布。S风向及邻近风向偏度普遍高于N风向及邻近风向,且随风速增加,S风向α分布右偏更明显,受极端值影响S风向α_μ被高估,其代表性进一步降低;N风向α分布更集中,α_m的表征性更稳定。

对[0,6.00) m/s风速α分布均值和众数进行误差分析如图5所示。研究表明,α_m误差均<α_μ,二者误差均随着风速的增加而增大。S及邻近风向的α_μ误差明显高于N及邻近风向,随着风速的增加误差增加的越明显。风速越大,α的有效数据量明显减少,α_μ和α_m的表征性会降低,导致整体误差偏高。分析结果再次表明α_m的表征性优于α_μ,二者表征性的差异在图中以误差的大小呈现。因此,选取平均风剖面指数分布众数α_m作为台址[0,2.00)、[2.00,4.00)、[4.00,6.00) m/s风速的16个风向对应的α参考值,统计如表2所示,可以有效提高台址风场特性的获取效率。

国家规范中对B类地形的描述为“田野、乡村、丛林、丘陵以及房屋比较稀疏的中小城镇和大城市郊区”,而QTT园区四周均为牧场,多以草地和松林为主,比较符合B类地形特征,多个研究均采用B类地形参数对QTT台址平均风剖面进行重构[31-32]。采用箱线图对α参考值与规范值进行误差分析,如图6所示。在[0,6.00) m/s风速内,与规范值相比,参考值表现出更优的实测吻合度,且风速越小,参考值的实测吻合度越高。基于RMSE值对精度进行计算,将[0,2.00)、[2.00,4.00)和[4.00,6.00) m/s的α参考值精度与B类规范值相比,精度分别提升了26.65%、15.76%和11.58%。

3.3 α特征分析

以上揭示了均值对极端值的敏感性,风场特性分析中极端值虽然引入统计偏差,但保留了极端风况的关键信息。应用图3中α_μ数据,得到台址16个风向下α_μ随风速变化曲线如图7所示。α_μ随风速整体在−0.285 7~0.383 6波动,最大值出现在[8.00,10.00) m/s的ENE风向,最小值出现在[0,2.00) m/s的W风向;在[0,6.00) m/s风速,α_μ随风速增加而增大,其中[0,2.00) m/s的α_μ均为负值;在[6.00,10.00) m/s风



注:图中左上角的字符串表示风向及对应的样本风向数据条数;α_{μ}表示正态分布拟合曲线的均值;α_{m}表示正态分布中出现频率最高区间的中值。

图4　80个风数据样本对应α分布统计

Figure 4　the distribution statistics of 80 wind data samples corresponding to α

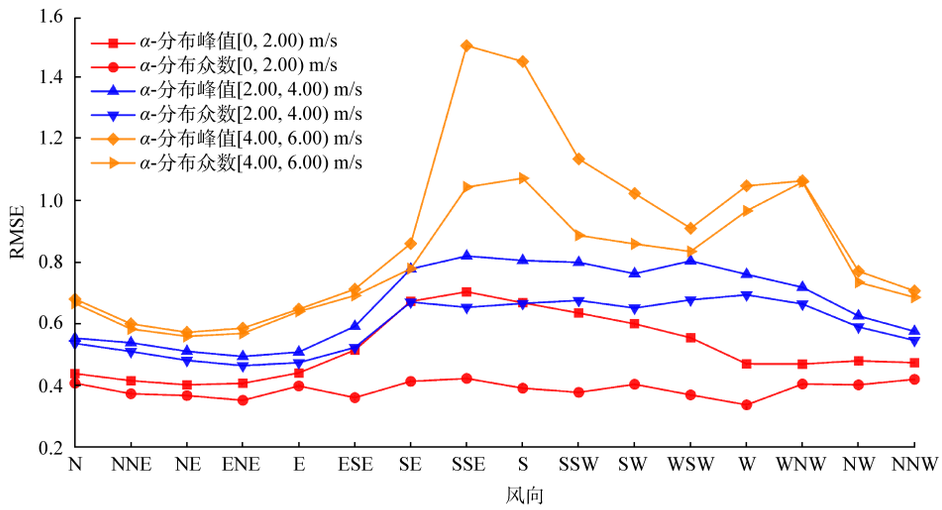


图5　α分布均值与分布众数误差点线

Figure 5　the error point graph of the mean and mode of the α distribution

表2　QTT台址16个标准风向对应的α参考值

Table 2　the α reference values corresponding to the 16 standard wind directions of the QTT site

风向	风速/(m·s^{-1})		
	[0,2.00)	[2.00,4.00)	[4.00,6.00)
N	−0.012 5	0.027 5	0.027 5
NNE	−0.087 5	0.027 5	0.027 5
NE	−0.087 5	−0.007 5	−0.007 5
ENE	−0.162 5	−0.007 5	0.027 5
E	−0.012 5	−0.007 5	0.027 9
ESE	−0.312 5	−0.007 5	0.132 5
SE	−0.162 5	−0.112 5	0.027 5
SSE	−0.162 5	−0.007 5	0.062 5
S	−0.312 5	0.027 5	0.097 5
SSW	−0.312 5	0.027 5	0.062 5
SW	−0.162 5	0.027 5	−0.007 5
WSW	−0.312 5	−0.007 5	−0.042 5
W	−0.462 5	−0.077 5	−0.042 5
WNW	−0.312 5	−0.077 5	−0.112 5
NW	−0.237 5	−0.007 5	0.027 5
NNW	−0.087 5	−0.042 5	0.027 5

速,α_μ随风速的变化呈现多样性;在N和S风向上α_μ随风速的变化趋势存在明显差异,S风向及其附近风向的α_μ随着风速的增加先增大后减小,N风向及其附近风向的α_μ随着风速的增加而逐渐增大。

结合台址地形分析表明,α_μ随风速的变化规律与地形和来风频率之间存在较强的相关性[33-34]。

(1)台址南面地形相对复杂,植被多为灌木丛,北面地形相对平缓,植被多为草地,形成N和S风向不同的粗糙度地形。当风在不同粗糙度的下垫面

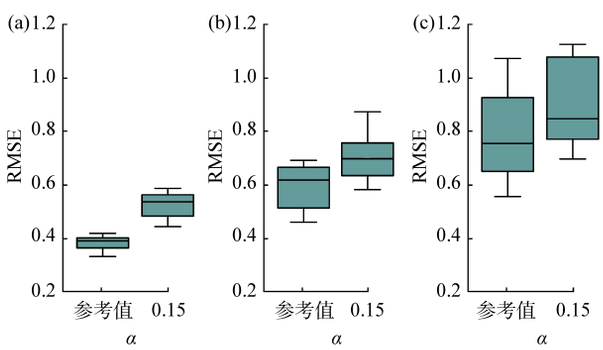


图6　平均风剖面指数RMSE误差箱线

(a)[0,2.00) m/s;(b)[2.00,4.00) m/s;(c)[4.00,6.00) m/s

Figure 6　average wind profile index RMSE error box plot

(a)[0,2.00) m/s;(b)[2.00,4.00) m/s;(c)[4.00,6.00) m/s

之间往复运动时,由于近地面空气的黏性效应,底层风速需要经过一段距离才能重新适应新的粗糙度影响,风剖面上下层之间出现不一致的风速变化,风剖面下层局部变窄或变宽,导致风剖面中部出现α负值[35]。而台址受南面雪山和北面平原沙漠形成的地方性环流影响,主要刮南风和北风,且中间低四周高的盆地地形,容易形成昼夜反向的山谷风环流[36],N和S风向上风速昼夜反向现象更为显著,导致近地面α出现负值的概率大幅增加。加之[0,2.00) m/s作为台址的主导风速,且风速小,是台址近地层α出现负值的高频风速段。

(2)台址南面的风速受下垫面粗糙度影响而减小,但随着风速的增加,下垫面对于气流的阻挡和削弱作用并未随之增加,或者慢于风速的增加,下垫面粗糙度的阻碍效果相对减小,导致S风向及其

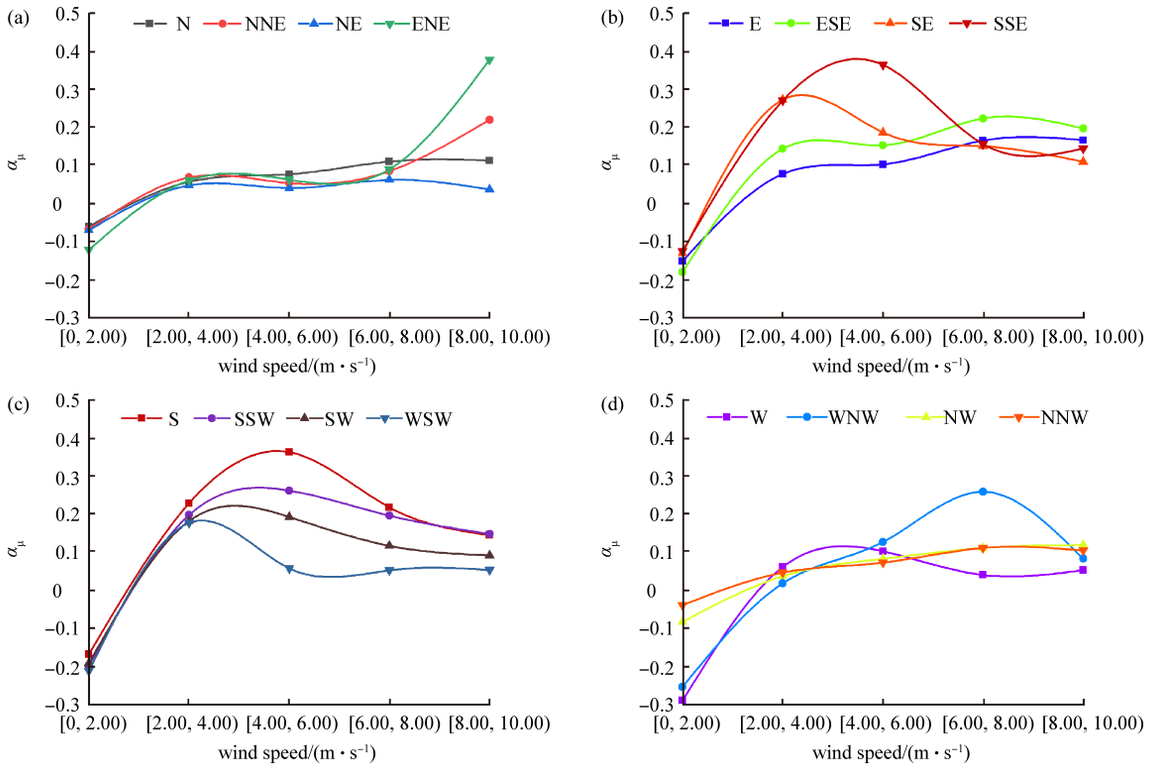


图7　16标准风向下α_μ随风速变化曲线

(a)N、NNE、NE、ENE风向;(b)E、ESE、SE、SSE风向;(c)S、SSW、SW、WSW风向;(d)W、WNW、NW、NNW风向

Figure 7　the curve graph of α_μ varying with wind speed under 16 standard wind directions

(a)N、NNE、NE、ENE wind direction;(b)E、ESE、SE、SSE wind direction;(c)S、SSW、SW、WSW wind direction;(d)W、WNW、NW、NNW wind direction

附近风向在[4.00,6.00) m/s的α值普遍高于6.00 m/s风向的α值,与已有研究结论一致[37-38]。

(3)台址北面NNW风向对应一处喇叭口地形,狭管效应加快了风速梯度之间的气流交换[39]。由于<6.00 m/s的风速百分比较大,低风速段气流之间交换作用占主导,下层风速梯度的α小于上层风速梯度的α,导致N风向及其附近风向的α_μ随着风速的增加而逐渐增大。

4　结　论

研究选取QTT台址梯度风塔2021年全年观测有效数据,经过风剖面指数律公式中参数的不同替换,得到了不同计算方法下的α,通过误差分析选取适合所选风数据的α计算方法,采用对数替换方法(3)精细计算α。根据α分布统计和实测吻合度的分析,得到了QTT台址16个标准风向下的α参考值,与B类地形下α规范值的计算精度相比,在[0,2.00)、[2.00,4.00)和[4.00,6.00) m/s风速,计算精度分别提升了26.65%、15.76%和11.58%。由于[6.00,10.00) m/s的风速数据有限,因此针对该风速下的α参考值有待后续更加深入的分析。最后,基于α分布均值对台址风场特性进行分析表明,α随风速的变化规律与台址地形和来风频率之间存在较强的相关性。

本文采用的α计算方法均为风剖面指数律模型的常用方法,误差分析为筛选合适的α计算方法提供了可靠依据,确保了计算结果的准确性。对数替换方法的运用,从指数函数到线性函数关系,表达形式更为直观,计算更加简便,结合拟合算法使得α的计算更加精细,提高了计算精度。在基于α开展QTT台址风场特性分析的过程中,从风速风向2个方面对α的分布特征进行讨论,并给出了α参考值。最后结合台址地形对风场的形成进行解释,与已有研究存在较好的一致性。在此基础上,要想进一步获取台址风场特性可以从2方面考虑:(1)风场的形成不仅仅是地形导致的结果,而是由多因素共同影响,因此可以考虑多种因素对平均风剖面指数的影响,从更多的数据上有效提取台址风场特性;(2)在

固有的风数据基础上提高风信息的获取效率同样值得关注,如α在计算时选取不同的时间尺度,会得到不同的α值。因此,选取合适的计算时距计算α同样可以提高台址风场的获取效率。为了进一步提高方法的适用性,未来可进一步开展多台址风场对比研究,优化计算方法和模型,使其适应更多的场景和需求。

本研究为大口径高精度射电望远镜的台址α计算提供了一种可选方法,通过对α进行精细计算与分析,得到了台址风场特性并给出了α参考值,为台址仿真研究中的边界条件提供了可选值,为台址抗风设计提供了数据支撑。目前国内陆续有多台大口径射电望远镜正在建设或筹划,本文研究可以为其他射电望远镜在台址选取、抗风设计等方面提供一种方法参考。为了进一步提高方法的适用性,可以开展多台址风场的对比研究,优化计算方法和模型,使其适应更多的场景和需求。

©The editorial department of Journal of Capital Normal University (Natural Science Edition) 2025. This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/).

参 考 文 献

[1] EMBERSON R M. National radio astronomy observatory: the early history and development of the observatory at Green Bank, West Virginia, are reviewed [J]. Science, 1959, 130 (3385): 1307-1318. DOI: 10.1126/science.130.3385.1307.

[2] WIELEBINSKI R, JUNKES N, GRAHL B H. The Effelsberg 100 m radio telescope: construction and forty years of radio astronomy [J]. Journal of Astronomical History and Heritage, 2011, 14: 3-21. DOI: 10.3724/SP.J.1440-2807.2001.01.01.

[3] WANG N, XU Q, MA J, et al. The Qitai radio telescope [J]. Science China Physics, Mechanics & Astronomy, 2023, 66(8): 289512. DOI: 10.1007/s11433-023-2131-1.

[4] NADDAF M. The science events to watch for in 2023 [J]. Nature, 2023, 613 (7942): 11-12. DOI: 10.1038/d41586-022-04444-3.

[5] PRESTAGE R M, CONSTANTIKES K T, HUNTER T R, et al. The Green Bank Telescope [J]. Proceedings of the IEEE, 2009, 97 (8): 1382-1390. DOI: 10.1109/jproc.2009.1015467.

[6] SMITH D R, PAGLIONE T A D, LOVELL A J, et al. Measurements of dynamic pointing variations of a large radio telescope [J]. SPIE, 2000, 4015: 467-475. DOI: 10.1117/12.390440.

[7] BUFFA F, BOLLI P, SANNA G, et al. An atmosphere monitoring system for the Sardinia radio telescope [J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28 (1): 014004. DOI: 10.1088/1361-6501/28/1/014004.

[8] HE F L, XU Q, WANG N, et al. A method to obtain the wind field characteristics of super-large aperture radio telescope site based on single-point wind tower and numerical simulation [J]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2020, 20 (12): 199. DOI: 10.1088/1674-4527/20/12/199.

[9] HEIER S. Grid integration of wind energy: onshore and offshore conversion systems [M]. 3rd ed. Kassel University: Fraunhofer Institute for Wind Energy and Energy System Technology, 2014.

[10] DAVENPORT A G. Rationale for determining design wind velocities [J]. Journal of the Structural Division, 1960, 126(5): 39-68. DOI: 10.1061/jsdeag.0000521.

[11] 李鹏,田景奎.不同下垫面近地层风速廓线特征[J].资源科学,2011,33(10):2005-2010.
LI P, TIAN J K. Characteristics of surface layer wind speed profiles over different under lying surfaces [J]. Resources Science, 2011, 33(10): 2005-2010.

[12] 毛汇,杨詠昕,朱进波,等.对数律和指数律风剖面的差异分析及其对桥梁抗风性能评价的影响[J].结构工程师, 2024, 40 (1): 22-28. DOI: 10.15935/j. cnki.jggcs.2024.01.001.
MAO H, YANG Y X, ZHU J B, et al. Comparative analysis on difference of logarithmic law and power law wind speed profile and its influence on evaluation of bridge wind-resistant performance [J]. Structural Engineers, 2024, 40(1): 22-28.

[13] 金莉莉,李振杰,缪启龙,等.乌鲁木齐市近地层风切变指数特征[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(4):81-86. DOI: 10.3969/j.issn.1002-0799.2016.04.012.
JIN L L, LI Z J, MIAO Q L, et al. Characteristics of the wind shear exponent of the near-surface layer in Urumqi City [J]. Desert and Oasis Meteorology, 2016, 10(4): 81-86.

[14] BOLBASOVA L A, SHIKHOVTSEV A Y, KOPYLOV E, et al. Daytime optical turbulence and wind speed distributions at the Baikal astrophysical observatory [J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2018, 482(2): 2619-2626. DOI: 10.1093/mnras/sty2706.

[15] WANG K, GUO Y, WANG X. Comparative study of the

near-surface typhoon wind profile fitting between offshore and onshore areas[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2021, 2021(1): 7422926. DOI: 10.1155/2021/7422926.

[16] 梅亮.重庆市山地地区近地层风切变研究[J].电力勘测设计, 2024, 12(4): 59-64. DOI: 10.13500/j.dlkcsj.issn1671-9913.2024.04.012.
MEI L. Research of surface layer wind shear in mountainous areas of Chongqing [J]. Electric Power Survey & Design, 2024, 12(4): 59-64.

[17] 汤浩,周雅蔓,杨杰尧,等.新疆百里风区强风中尺度特征分析[J].沙漠与绿洲气象, 2022, 16(4): 1-8. DOI: 10.12057/j.issn.1002-0799.2022.04.001.
TANG H, ZHOU Y M, YANG J Y, et al. Mesoscale characteristics of strong wind in Xinjiang 100-kilometer gale area[J]. Desert and Oasis Meteorology, 2022, 16(4): 1-8.

[18] 李唐孟卓,哈菲莎,马福云,等.奇台县近地面风时空分布特征统计分析[J].农业灾害研究, 2021, 11(12): 35-37.
LI T M Z, HA F S, MA F Y, et al. Statistical analysis of temporal and spatial distribution characteristics of near surface wind in Qitai County[J]. Journal of Agricultural Catastropholgy, 2021, 11(12): 35-37.

[19] 李琳,许谦,王文娟,等.基于自回归滑动平均模型的大口径天线风速预测方法[J].天文学报, 2022, 63(6): 119-133. DOI: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2022.06.011.
LI L, XU Q, WANG W J, et al. ARMA model-based wind speed prediction for large radio telescope[J]. Acta Astronomica Sinica, 2022, 63(6): 119-133.

[20] CAO J L, XUE W H, MAO R, et al. Wind power in forested regions: power law extrapolation vs. Lidar observation [J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2023, 232: 105281. DOI: 10.1016/j.jweia.2022.105281.

[21] 刘星辉,陈钰彤,梁飞,等.超声波风速传感器的误差分析及应用[J].实验室检测, 2025, 3(1): 143-145. DOI: 10.3969/j.issn.1673-0291.2025.1.sysjy202501043.
LIU X H, CHEN Y T, LIANG F, et al. Error analysis and application of ultrasonic wind speed sensor [J]. Laboratory Testing, 2025, 3(1): 143-145.

[22] 曾祥豹,胡义东,王露,等.压电超声共振式风传感器风场闭环解算策略研究[J].压电与声光, 2023, 45(3): 467-470. DOI: 10.11977/j.issn.1004-2474.2023.03.027.
ZENG X B, HU Y D, WANG L, et al. Study on the closed-loop solving strategy of piezoelectric ultrasonic resonant wind sensor[J]. Piezoelectric & Acoustooptics, 2023, 45(3): 467-470.

[23] 龚强,汪宏宇,朱玲,等.辽宁省近地层风切变特征研究[J].自然资源学报, 2015, 30(9): 1560-1569. DOI: 10.11849/zrzyxb.2015.09.012.
GONG Q, WANG H Y, ZHU L, et al. Study on the near surface wind shear characteristics in Liaoning Province [J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(9): 1560-1569.

[24] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3814.2010.05.015.
DU Y J, FENG C Q. Application of wind shear index in the assessment of wind resources of wind farm [J]. Power System and Clean Energy, 2010, 26(5): 62-66.

[25] 朱金阳,丁伟.平坦地形风剪切特性的研究[J].太阳能学报, 2023, 44(2): 167-171. DOI: 10.19912/j.0254-0096.tynxb.2021-1156.
ZHU J Y, DING W. Research of wind shear characteristics in flat terrain [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(2): 167-171.

[26] ABDALLA A, EL-OSTA W, NASSAR Y F, et al. Estimation of dynamic wind shear coefficient to characterize best fit of wind speed profiles under different conditions of atmospheric stability and terrains for the assessment of height-dependent wind energy in Libya[J]. Applied Solar Energy, 2023, 59(3): 343-359. DOI: 10.3103/s0003701x23600212.

[27] WERAPUN W, TIRAWANICHAKUL Y, WAEWSAK J. Wind shear coefficients and their effect on energy production[J]. Energy Procedia, 2017, 138: 1061-1066. DOI: 10.1016/j.egypro.2017.10.111.

[28] KIM H G, KIM B M, KIM J H, et al. Prediction of wind shear exponent in complex terrain [J]. Journal of the Korean Solar Energy Society, 2012, 32(2): 87-94. DOI: 10.7836/kses.2012.32.2.087.

[29] 郭凤霞,朱文越,饶瑞中.非均一地形近地层风速廓线特点及粗糙度的研究[J].气象, 2010, 36(6): 90-94. DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2010.06.014.
GUO F X, ZHU W Y, RAO R Z. Study on the feature of surface layer wind velocity profile and the roughness over non-homogeneous landform [J]. Meteorological Monthly, 2010, 36(6): 90-94.

[30] 仝可,唐薇,陈文锋,等.统计概要表征的内容与机制[J].心理科学进展, 2015, 23(10): 1723-1731. DOI: 10.3724/SP. J.1042.2015.01723.
TONG K, TANG W, CHEN W F, et al. Statistical summary representation: contents and mechanisms[J]. Advances in Psychological Science, 2015, 23(10): 1723-1731.

[31] 刘岩,钱宏亮,范峰.大型射电望远镜结构风荷载特性

研究[J].红外与激光工程,2015,44(1):148-156. DOI:10.3969/j.issn.1007-2276.2015.01.026.
LIU Y,QIAN H L,FAN F. Wind load characteristics of large radio telescope [J]. Infrared and Laser Engineering,2015,44(1):148-156.

[32] LI S,HAN B Q,LIU S Y,et al. Simulation-driven wind load analysis and prediction for large steerable radio telescopes[J]. Research in Astronomy and Astrophysics,2023,23(2):20-29. DOI:10.1088/1674-4527/acae6d.

[33] NGO T T,LETCHFORD C W. Experimental study of topographic effects on gust wind speed[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,2009,97(9/10):426-438. DOI:10.1016/j.jweia.2009.06.013.

[34] 叶笃正.小地形对于气流的影响[J].气象学报,1956(3):243-262. DOI:10.11676/qxxb1956.018.
YE D Z. Topography effect on the airflow [J]. Acta Meteorologica Sinica,1956(3):243-262.

[35] 吴莎,余官培,卢胜,等.风电工程中负切变现象的分析研究[J].太阳能,2021(6):67-77. DOI:10.19911/j.1003-0417.tyn20200514.02.
WU S,YU G P,LU S,et al. Analysis of negative shear force phenomenon in wind power engineering[J]. Solar Energy,2021(6):67-77.

[36] 吕新生,王旭,蔡仁,等.乌鲁木齐辖区山谷风环流特征的分析[J].干旱区地理,2016,39(6):1172-1180. DOI:10.13826/j.cnki.cn65-1103/x.2016.06.003.
LYU X S,WANG X,CAI R,et al. Characteristics of mountain-valley breeze in Urumqi area[J]. Arid Land Geography,2016,39(6):1172-1180.

[37] 刘敏,孙杰,杨宏青,等.湖北省不同地形条件下风随高度变化研究[J].气象,2010,36(4):63-67. DOI:10.7519/j.issn.1000-0526.2010.04.011.
LIU M,SUN J,YANG H Q,et al. The study on wind speed change with height under different terrain conditions in Hubei Province[J]. Meteorology,2010,36(4):63-67.

[38] 石雪峰,夏建新,吉祖稳.植被条件对近地表风速垂线分布的影响[J].中央民族大学学报(自然科学版),2007,16(1):9-15. DOI:10.3969/j.issn.1005-8036.2007.01.003.
SHI X F,XIA J X,JI Z W. The effect of vegetation condition on wind velocity perpendicular line distribution in the near ground[J]. Journal of Minzu University of China(Natural Science Edition),2007,16(1):9-15.

[39] 贺志明,聂秋生,刘熙明,等.鄱阳湖区近地层风能资源特征研究[J].资源科学,2011,33(1):184-191.
HE Z M,NIE Q S,LIU X M,et al. Surface-layer wind energy resources over the Poyang Lake Area [J]. Resources Science,2011,33(1):184-191.

(责任编辑:兰丽丽)

(上接第43页)

[17] 甘勇天,马连生.热载荷作用下对称S型功能梯度圆板的非线性力学行为[J].固体力学学报,2022,43(2):158-167. DOI:10.19636/j.cnki.cjsm42-1250/o3.2021.056.
GAN Y T,MA L S. Nonlinear mechanical behavior of symmetric S-FGM circular plates under thermal loads [J]. Chinese Journal of Solid Mechanics,2022,43(2):158-167.

[18] 周良强,陈予恕,陈芳启.超音速气流中受热壁板的非线性动力学分析[J].科学技术与工程,2010,10(19):4744-4747. DOI:10.3969/j.issn.1671-1815.2010.19.033.
ZHOU L Q,CHEN Y S,CHEN F Q. Nonlinear dynamic analysis of heated panels in supersonic flow[J]. Science Technology and Engineering,2010,10(19):4744-4747.

[19] 杨智春,张蕊丽.基于最大李雅普诺夫指数的壁板热颤振特性分析[J].西北工业大学学报,2009,27(6):770-776. DOI:10.3969/j.issn.1000-2758.2009.06.005.
YANG Z C,ZHANG R L. Thermal flutter characteristics of panels based on maximum Lyapunov exponent[J]. Journal of Northwestern Polytechnical University,2009,27(6):770-776.

[20] 张继业,杨翊仁,曾京.Hopf分岔的代数判据及其在车辆动力学中的应用[J].力学学报,2000,32(5):596-605. DOI:10.3321/j.issn.0459-1879.2000.05.011.
ZHANG J Y,YANG Y R,ZENG J. Algebraic criterion for Hopf bifurcation with application to vehicle dynamics [J]. Acta Mechanics Sinica,2000,32(5):596-605.

[21] BOUAMAMA M,ELMECHE A,ELHENNANI A,et al. Exact solution for free vibration analysis of FGM beams[J]. Journal of Composite & Advanced Materials/Revue des Composites et des Matériaux Avancés,2020,30(2):55-60. DOI:10.18280/rcma.300201.

[22] 杨智春,周建,谷迎松.超音速气流中受热曲壁板的非线性颤振特性[J].力学学报,2012,44(1):30-38. DOI:10.6052/0459-1879-2012-1-lxxb2010-853.
YANG Z C,ZHOU J,GU Y S. Nonlinear flutter characteristics of heated curved panels in supersonic flow [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics,2012,44(1):30-38.

(责任编辑:兰丽丽)